ISSN 2220-0983

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

57/2019

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

Санкт-Петербург

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

ИЗДАЕТСЯ С 1995 ГОДА

57
2019

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербург

Главный редактор
к. т. н. А. А. Якушев

Редакционная коллегия:

д. т. н. П. И. Малеев (научный редактор); к. г.-м. н. И. Ю. Бугрова (редактор);
к. в. н. В. Ю. Бахмутов (ответственный за выпуск);
д. т. н., профессор Э. С. Зубченко, д. в. н., проф. А. И. Исмаилов;
д. в. н., проф. В. А. Катенин; к. т. н. Н. И. Леденёв; д. т. н. С. И. Мастрюков;
д. т. н., проф. Н. Н. Неронов; акад. РАН В. Г. Пешехонов;
д. т. н., профессор К. Г. Ставров; к. т. н. А. М. Шарков;
д. ф.-м. н., профессор Г. Г. Щукин

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень рецензируемых
научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук»

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

© Акционерное общество
«Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт»
2019

THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC INSTITUTE

NAVIGATION AND HYDROGRAPHY

PUBLISHED SINCE 1995

57
2019

RUSSIAN FEDERATION MINISTRY OF DEFENCE

Saint-Petersburg

Editor-in-chief
A. Yakushev, CandSc

Editorial board

P. Maleyev, DSc (science editor); I. Bugrova (editor), CandSc;
V. Bakhmutov (the issue manager), CandSc;
E. Zubchenko, DSc, professor; A. Ismailov, DSc, professor;
V. Katenin, DSc, professor; N. Ledenev, CandSc; S. Mastryukov, DSc;
N. Neronov, DSc, professor; V. Peshekhonov, DSc, Acad. RAS;
K. Stavrov, DSc, professor;
A. Sharkov, CandSc; G. Shchukin, DSc, professor

© Joint Stock Company
«The State Research Navigation-Hydrographic Institute»
2019

СОДЕРЖАНИЕ

НАВИГАЦИЯ

Развитие навигационных комплексов ракетных подводных лодок стратегического назначения в период создания и становления Морских стратегических ядерных сил. А. И. Исмаилов 7

Навигационно-гидрографическое обеспечение ракетных подводных лодок стратегического назначения в период создания и становления Морских стратегических ядерных сил. А. И. Исмаилов 17

Новые возможные направления создания средств высокоточной навигации морских объектов. П. И. Малеев 28

Алгоритм формирования автономной бортовой шкалы времени космического аппарата с использованием технологии приёма и обработки излучения пульсаров в интересах частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС. В. Н. Цыкунов 38

Об определении относительной скорости автономных необитаемых подводных аппаратов тахометрическим способом. К. А. Виноградов, С. И. Иванов 49

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

Автоматизированный метод обнаружения объектов на морском дне по данным многолучевых гидролокаторов. В. Ю. Бахмутов, Ю. Н. Жуков 58

Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования уровня моря. Ю. Н. Жуков, Е. В. Федорова 66

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Современные подходы к оценке климатических рисков. С. И. Мастрюков 76

Оценка повторяемости некоторых радиометеорологических явлений, способствующих загоризонтному распространению радиоволн над морем у восточного побережья Камчатки. С. И. Мастрюков 83

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 95

РЕФЕРАТЫ 96

CONTENTS

NAVIGATION

Development of Navigation Complexes Missile Submarines of Strategic in the Period of Creation and Formation of Naval Strategic Nuclear Forces. A. I. Ismailov.. 7

Navigation and Hydrographic Support Missile Submarines of Strategic in the Period of Creation and Formation of Naval Strategic Nuclear Forces. A. I. Ismailov.. 17

New Possible Directions of Creation of Means of High-Precision Navigation of Marine Objects. P. I. Maleev. 28

The Algorithm of Formation of an Autonomous Onboard Time Scale of the Spacecraft Using the Technology of Receiving and Processing Radiation of Pulsar in the Interests of Time-Frequency Support of GLONASS. V. N. Tsykunov 38

On Determining the Relative Speed of Autonomous Underwater Vehicles by Tachometric Method. K. A. Vinogradov, S. I. Ivanov 49

HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY

An Automated Method for Detecting Objects on the Seabed According to Multibeam Sonar. V. Yu. Bakhmutov, Yu. N. Zhukov.. 58

Application of Artificial Neural Networks for Sea Level Forecasting. Yu. N. Zhukov, E. V. Fedorova.. 66

HYDROMETEOROLOGY

Modern Approaches to Climate Risks Estimation. S. I. Mastryukov.. 76

The Estimation of the Recurrence of Some Radio Meteorological Phenomena that Contributing to the Over-the-Horizon Propagation of Radio Waves Over the Sea Off the Eastern Coast of Kamchatka. S. I. Mastryukov..... 83

INFORMATION ABOUT AUTHORS 95

ABSTRACTS 96

НАВИГАЦИЯ

УДК 359/527

Памяти сотрудников АО «ГНИНГИ» – первопроходцев в области создания и развития навигационного вооружения ракетных подводных лодок стратегического назначения

РАЗВИТИЕ НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ РАКЕТНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК СТРАТЕГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ПЕРИОД СОЗДАНИЯ И СТАНОВЛЕНИЯ МОРСКИХ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ СИЛ

А. И. ИСМАИЛОВ
(АО «ГНИНГИ»)

Рассмотрена история становления и развития технических (бортовых) средств навигации ракетных подводных лодок стратегического назначения. Показаны место и роль 9 НИИ ВМФ и его сотрудников в создании и развитии навигационных комплексов подводных ракетоносцев.

На начальных стадиях создания морской составляющей отечественной системы Стратегических ядерных сил комплексирование бортовых (технических) средств навигации ракетных подводных лодок стратегического назначения (РПЛСН) не получило должного развития, поскольку острой необходимости в создании для них единой системы навигационного вооружения еще не существовало. Задачи навигационного обеспечения применения стратегического ракетного оружия и обеспечения безопасности кораблевождения подводных ракетоносцев успешно решались с использованием отдельных, не связанных между собой, навигационных приборов [1].

Только с появлением баллистических ракет подводных лодок (БРПЛ) межконтинентальной дальности произошел качественный скачок в развитии навигационного вооружения РПЛСН. Однако первый советский навигационный комплекс (НК) был создан не для ракетной, а многоцелевой атомной подводной лодки (МПЛА).

К работам по созданию навигационного комплекса для МПЛА проекта (пр.) 627 «Ленинский комсомол» в начале 1950-х годов приступили в Московском научно-исследовательском институте морского приборостроения (НИИ-25)[1)].

Главным конструктором первого НК, получившего название «Плутон», был директор НИИ-25 У. И. Эллер (1905–1980), а его заместителем и конструктором гироскопической части НК «Плутон» – А. И. Вдовин (1914–1974).

К середине 1950-х годов НК «Плутон» был создан. В его состав входили два апериодических гирокомпаса (ГК) «Маяк», гироазимутгоризонт (ГАГ) «Сатурн»,

[1)] В настоящее время АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения».

ртутный относительный лаг (0Л) «Бурун» и автопрокладчик (АП) «Терек». Комплекс решал задачу счисления и отображения места на морской карте в широте до 80º северной широты (с. ш.) и транслировал потребителям навигационные параметры (курс, скорость хода, географические координаты) в аналоговом виде.

Дальнейшим развитием НК «Плутон» явилась его модификация для ракетных подводных лодок «Плутон-1», в состав которого были дополнительно включены астронавигационная система «Лира» и автомат измерения пеленга и дистанции «Марс».

В решении различных организационных и технических вопросов при создании НК «Плутон» и его модификации «Плутон-1» приняли участие О. В. Кищенков (впоследствии главный конструктор первого НК с инерциальной навигационной системой (ИНС), Г. Д. Блюмин, М. А. Шиф (разработчик ГК «Маяк»), академик Академии наук СССР А. Ю. Ишлинский. От ВМФ в создании первых НК подводных лодок активное участие принимали В. К. Бобышев, В. Д. Теплов, А. М. Червяков, М. Ф. Юрьев, Н. И. Щукин, В. Д. Шандабылов, Н. Л. Бирюков, Н. П. Капошко, М. М. Котов, А. В. Фокин и др. В установке навигационного комплекса на строящиеся подводные лодки и их испытаниях принимали участие молодые штурманы и гидрографы М. Т. Александров, В. С. Васильев, А. А. Волин, В. А. Монтелли, Ю. Г. Хлыпало и др. [2, 3].

Для решения новых возникших проблем НГО РПКСН были перепрофилированы специальные научно-исследовательские институты в Москве (НИИ-944[2)]), Ленинграде (НИИ-303[3)]; конструкторское бюро КБ-339 при заводе штурманских приборов[4)]), Баку (НИИ-949[5)]). Кроме того, были привлечены силы многих научных учреждений, работающих в области радиоэлектроники, гироскопии, вычислительной техники, радионавигационных систем, оптики, радиоастрономии и других областях [4–7].

В 1953 г. к разработке гироскопических приборов для атомных подводных лодок (ПЛ) был привлечен НИИ-303 (ЦНИИ «Электроприбор») – единственное в то время предприятие, обладавшее технологией изготовления гироскопов на аэродинамическом подвесе. По результатам проведенных в 1950-х годах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в НИИ-303 был разработан НК «Сила Н» (главный конструктор В. И. Маслевский, его заместитель З. Д. Рихтерман), основанный на применении шаровых гироскопов и аналоговых электромеханических счетно-решающих устройств и элементов. Следует отметить, что комплекс «Сила-Н» был дополнительно включен в состав навигационного вооружения МПЛА «Ленинский Комсомол» и в 1962 г. обеспечивал первый в истории советского ВМФ поход на Северный полюс.

В период с 11 по 21 мая 1962 г. МПЛА «Ленинский Комсомол» совершила переход из Баренцева моря через Гренландское море к Северному полюсу и обратно. В этом походе участвовали сотрудники 9 НИИ ВМФ А. В. Федотов и В. А. Монтелли, которые занимались испытаниями приборов НК «Сила-Н» и

[2)] В настоящее время ФГУП «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова».

[3)] В настоящее время АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Государственный научный центр РФ.

[4)] В настоящее время ОАО «Штурманские приборы».

[5)] В 1966 г. переименован в Бакинский электромеханический институт (БЭМИ), а в последующем на его основе в 1982 г. было создано Научно-производственное объединение (НПО) «Норд». В 2008 г. предприятие переименовано в Научно-производственное предприятие «Далга».

«Плутон», дооборудованных для плавания в широтах выше 80º с. ш., эхоледомеров, эхолотов при подледном плавании в высоких широтах [8].

За образцовое выполнение заданий командования в этом походе капитаны 2 ранга А. В. Федотов и В. А. Монтелли были награждены орденами «Красной Звезды».

В апреле 1963 г. за активное участие в разработке и внедрении НК «Сила-Н» сотрудники 9 НИИ ВМФ В. Н. Дукальский и В. Д. Теплов были удостоены Ленинской премии.

В связи с тем, что навигационные комплексы «Плутон» и «Сила Н» в штатной комплектации не обеспечивали плавание ПЛ в широтах выше 80º с. ш., Военно-морским флотом в конце 1950-х годов было выдано техническое задание на разработку всеширотного НК. Трудность создания такого НК заключалась в том, что использовать гирокомпасы при приближении к полюсу было нельзя, так как они теряли направляющую силу, заставляющую их чувствительные элементы приходить в меридиан. На этих широтах невозможно было использовать автопрокладчики, работающие в меркаторской проекции.

Выход из сложившейся ситуации был найден коллективом инженеров НИИ-303 под руководством В. И. Маслевского, который совместно со специалистами 9 НИИ ВМФ В. А. Климатовичем, А. П. Князевым, В. А.Монтелли В. Д. Шандабыловым разработал и внедрил в системы курооуказания, автосчисления и прокладки «квазигеографическую систему координат». В этой системе «Северный полюс» переносился по меридиану на 180º на экватор. В системе квазигеографических координат район географического Северного полюса оказывался в зоне «квазиэкватора». Сходимость меридианов становилась пренебрежимо малой. Таким образом, трудности курсоуказания, счисления и автоматической прокладки в высоких широтах были преодолены [9].

Разработка квазигеографической системы координат позволила вплотную подойти к созданию всеширотного НК.

В 1963–1964 гг. головной образец всеширотного НК под шифром «Сигма» (главный конструктор В. И. Маслевский, его заместитель Ю. Д. Рихтерман) прошел успешно государственные испытания на атомном подводном ракетном крейсере пр. 627а «К-181» (командир корабля капитан 1 ранга Ю. А. Сысоев, командир штурманской боевой части (БЧ-1) капитан-лейтенант В. М. Храмцов, командир электронавигационной группы лейтенант К. Я. Богомазов) в ходе похода в район Северного полюса. Одновременно с НК «Сигма» проходили испытания усовершенствованный эхоледомер и комплекс новой телевизионной аппаратуры. В 1965 г. комплекс «Сигма» был принят на вооружение [10].

На первом отечественном всеширотном НК в отличие от ранее созданных НК для ПЛ была создана новая по тому времени система курсоуказания на базе трёх апериодических гирокомпасов «Маяк-2» и трёх гироазимутов (прибор 260), центрального счётно-решающего прибора (прибор 26). Кроме того, в состав комплекса входили: система центральной гировертикали «Сектор», состоящая из двух гировертикалей (прибор 261); относительный лаг «Скиф»; автопрокладчик «Сапфир»; астронавигационная система (АНС) «Сегмент» с навесной гировертикалью «Сегмент В»; радиосекстан «Самум»; система фиксации времени «Фиксатор 2М»; система питания, сигнализации и связи «Сигма-ПС» [11].

Принципиально новыми в составе НК «Сигма» были счётно-решающий прибор 26, управляющий работой гирокомпаса и гироазимутов, а также дифференциально-сглаживающее устройство, осредняющее разности курсов, выработанных указанными системами. Включение в состав комплекса радиосекстана «Самум» обеспечивало возможность астрономических наблюдений по Солнцу независимо от метеоусловий.

Впервые в истории удалось решить непростую для того времени задачу автоматического курсоуказания и счисления как в географической, так и квазигеографической системах координат [12].

В испытаниях и освоении НК «Сигма», разработке руководящих документов по его использованию принимали участие такие специалисты 9 НИИ ВМФ как В. И. Дмитриев, В. Н. Дукальский, В. А. Монтелли, Л. К. Овчинников, Е. Д. Теплов, И. И. Тузов, А. В. Федотов, В. Н. Фрадкин и др. [3].

НК первого поколения позволили успешно решать задачи НГО использования БРПЛ и безопасности кораблевождения РПЛСН и МПЛА во всех стратегически важных районах Мирового океана. Однако эти комплексы обладали и рядом существенных недостатков, к числу основных из которых можно отнести:

– зависимость точности выработки навигационных параметров от маневрирования корабля;
– снижение точности гирокомпасов при плавании в высоких широтах;
– большое количество ручных операций и расчетов при обработке навигационной информации и др.

Кроме того, появление в 1970-х годах баллистических ракет нового поколения не только значительно повысило требование к точности выработки навигационных параметров, но и потребовало увеличения числа вырабатываемых навигационных данных для стрельбы БРПЛ. Для устранения указанных недостатков нужно было иметь более совершенное навигационное вооружение РПЛСН. Недостатки аналоговых НК могли быть устранены только применением высокоточных инерциальных систем и цифровых вычислительных средств.

В 1972 г. в НИИ-944 (ЦНИИ «Дельфин») под руководством О. В. Кищенкова был создан первый отечественный НК с ИНС «Тобол» [13]. Его созданию предшествовала большая научно-исследовательская и экспериментальная работа, выполненная 9 НИИ ВМФ и НИИ-944 совместно с организациями Академии наук СССР.

Всесторонние испытания НК «Тобол» показали его высокую эффективность по сравнению с аналоговыми НК. Благодаря использованию ИНС, гидроакустического лага, электронно-вычислительных средств и более совершенного математического аппарата комплекс обеспечивал выработку навигационных параметров с достаточно высокой точностью. Так, удалось снизить погрешности курсоуказания в 15 раз. Новый НК был менее возмущаем при маневрировании подводного ракетоносца и решал более широкий круг навигационных задач.

В последующем, с 1970 по 1985 гг., ЦНИИ «Дельфин» разработал несколько модификаций НК «Тобол», постепенно совершенствуя их структуру и повышая точность выработки навигационных параметров. В одну из модификаций НК впервые было включено средство коррекции координат и курса (УДДК-1) по сигналам спутниковой навигационной системы (СНС). Возросло время хранения навигационных параметров с заданной точностью.

В 1983 г. за разработку, испытание и внедрение НК II поколения «Тобол» и его модификаций Государственной премии СССР были удостоены ряд сотрудников ЦНИИ «Дельфин» во главе с главным конструктором комплекса О. В. Кищенковым. Государственной премии СССР был награжден и сотрудник 9 НИИ ВМФ Л. К. Овчинников. Активное участие в создании НК «Тобол» для РПЛСН принимали такие специалисты 9 НИИ ВМФ, как С. И. Долгих, А. Ю. Морозов, Ю. Н. Пленицын, Б. И. Подорожный, В. В. Понкрашев, В. Н. Фрадкин и др.

С созданием в ВМФ РПЛСН 3-го поколения с новыми КРК СН еще более ужесточились требования к точности выработки навигационных параметров и ко времени их хранения. Возникла необходимость в выработке не только навигационных, но и геофизических параметров. Создание НК для РПЛСН 3-го поколения предполагалось вести на конкурсной основе в ЛНПО «Азимут» (руководитель работ В. Г. Гордеев, заместитель В. Г. Пешехонов) и ЦНИИ «Дельфин» (руководитель работ О. В. Кищенков). Однако конкурса как такового не получилось. В результате на вооружение РПЛСН последних проектов были приняты два типа НК: НК «Симфония» разработки ЛНПО «Азимут» и НК «Шлюз» разработки ЦНИИ «Дельфин». НК «Симфония» был принят ВМФ в 1983 г. За его создание сотрудникам ЛНПО «Азимут» В. Г. Пешехонову была присвоена Ленинская премия, а А. С. Афиногенову и Е. Е. Гусинскому – Государственная премия СССР. Государственной премии СССР был удостоен и сотрудник 9 НИИ ВМФ И. И. Тузов. В создании, испытаниях и внедрении НК «Симфония» и его чувствительных элементов активное участие принимали сотрудники 9 НИИ ВМФ: Г. И. Емельянцев, В. П. Линьков, В. В. Лосев, П. И. Малеев, В. А. Монтелли, А. Ю. Морозов, Е. Е. Петухов, А. В. Федотов, В. Н. Фрадкин и др.

НК «Шлюз» был создан в 1989 г. За его создание и внедрение ряд сотрудников ЦНИИ «Дельфин» (Ю. П. Баранов, А. Ю. Лидин, Ю. Л. Смоллер и др.), а также сотрудник 9 НИИ ВМФ Б. Е. Иванов были удостоены Государственной премии СССР. Активное участие в работах по созданию, испытанию и внедрению НК «Шлюз» принимали участие и специалисты 9 НИИ ВМФ: В. Г. Дзюба, С. Ю. Дорошенко, В. К. Иванов, А. А. Нестеров, Ю. Н. Пленицын, Д. В. Теплов и другие.

Создание навигационных комплексов «Симфония» и «Шлюз» позволило успешно решить проблему навигационного обеспечения современных российских РПЛСН.

В создании навигационного вооружения РПЛСН важную роль играли Главное управление навигации и океанографии Министерства обороны СССР (ГУНиО МО СССР) в целом и её начальники в частности. Здесь можно отметить начальника ГУНиО МО СССР (1963–1986 гг.) адмирала А. И. Рассохо. Во многом благодаря Анатолию Ивановичу удалось создать и внедрить навигационные комплексы подводных лодок II и III поколений.

ГУНиО МО СССР удалось внести в разработку новых НК некоторый дух конкуренции, негласного соревнования между создателями этик комплексов Москвы и Ленинграда. Это соперничество, без сомнения, сыграло свою положительную роль. Коллективы разработчиков действительно трудились самоотверженно, с полной отдачей сил.

Создание НК с ИНС для РПЛСН III поколения потребовало проведения теоретических исследований и создание новой элементной базы и соответствующего

программного обеспечения. К этим работам были привлечены институты АН СССР, ВМФ и организации промышленности.

Параллельно с разработкой ИНС в 9 НИИ ВМФ проводились в 1964–1967 гг. широкие исследования по разработке теории построения морских ИНС, изучению перспектив создания высокоточных чувствительных элементов [14, 15].

Благодаря работам, проводимых в ЛНПО «Азимут» (в последствии ЦНИИ «Электроприбор») с середины 1950-х годов по созданию шарового вакуумного гироскопа с электростатическим подвесом ротора (главный конструктор А. С. Афиногенов), был создан гирокорректор «Скандий» (главный конструктор В. З. Гусинский) [16]. Военное научное сопровождение создания гирокорректора «Скандий» осуществлял П. И. Малеев. Использование гирокорректора в составе НК «Симфония» совместно с ИНС полуаналитического типа «Стеллит» обеспечило существенное (в 3–5 раз) повышение точности выработки навигационных параметров [17].

Одним из важнейших навигационных параметров для РПЛСН является абсолютная скорость хода корабля (скорость хода ПЛ относительно дна). Результаты научных исследований, проведенных в 1957 г., показали перспективность использования для измерения абсолютной скорости хода корабля гидроакустического излучения.

Работы по созданию гидроакустического лага (ГАЛ) были начаты в 1958 г., в НИИ-3 Минсудпрома СССР[6)], возглавляемым В. И. Бородиным, коллективом в составе В. Н. Баранова, Г. В. Голелкина, Б. Л. Трущелева, Г. В. Яковлева и др. [18].

К началу 1960-х годов был успешно завершен первый этап работ. Испытания макетного образца гидроакустического доплеровского лага подтвердили его работоспособность и правильность выбранных технических решений. В 1966 г. первый отечественный ГАЛ, не имевший зарубежных аналогов, был принят на вооружение ВМФ.

В процессе разработки и испытаний первых ГАЛ активное участие принимали специалисты 9 НИИ ВМФ: О. Л. Грибанов, А. А. Мазепа, П. М. Нефедов, С. В. Панов и др. В дальнейшем в работах по совершенствованию ГАЛ активное участие принимали такие специалисты 9 НИИ ВМФ, как Б. Н. Осюхин, П. И. Малеев и др.

Значительное внимание сотрудники 9 НИИ ВМФ уделяли созданию современных эхолотов для ПЛ. В создании и испытаниях эхолотов серии «Малога» активное участие принимали К. А. Винградов, П. И. Малеев и др.

Вооружение подводных ракетоносцев БРПЛ потребовало более точного знания курса и, в частности, курсовой коррекции гироскопических НС. Одним из путей решения этой задачи стало создание специализированных астронавигационных перископов [19].

В 1955–1958 гг. в Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С. И. Вавилова[7)] коллективом разработчиков во главе с А. Е. Елькиным при участии ученых и специалистов ВМФ и судостроительной промышленности были созданы первые образцы двухканальных оптических астронавигационных систем (АНС) «Лира-I» и «Лира-II». Опытное производство АНС было освоено

[6)] С 1966 г. ЦНИИ «Морфизприбор». В настоящее время – АО «Концерн «Океанприбор».
[7)] В настоящее время АО «Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова».

Государственным оптико-механическим заводом[8)], а серийное – Казанским оптико-механическим заводом[9)] [20, 21]. В 1960 г. АНС «Лира-I» была принята на вооружение в составе НК «Плутон-1», а АНС «Лира-II» в составе НК «Север-Н»[10)].

В дальнейшем конструкторским коллективом ГОИ во главе с Е. И. Митиным в период 1964–1969 гг. был разработан новый тип АНС – прецизионный оптический перископный астрокорректор с жесткими оптико-механическими связями внутренних отчётных баз с контрольными базовыми элементами, «материализующими в инерциальном навигационном комплексе палубную систему координат». Этот астрокорректор на долгие годы стал основным астронавигационным средством на отечественных РПЛСН. Среди учёных и специалистов 9 НИИ ВМФ, участвовавших в создании АНС ПЛ, можно отметить В. А. Монтелли, Л. К. Овчинникова и др.

В конце 1950-х годов в Главной Астрономической обсерватории и Физическом институте АН СССР группой исследователей во главе с профессором А. П. Молчановым были развернуты научно-исследовательские работы по изучению смещений эффективного центра радиоизлучений Солнца. Их результаты позволили к 1964 г. в НИИ-303 под руководством М. К. Петушкова создать, а в 1965 г. принять на вооружение ВМФ радиосекстан «Самум». Дальнейшее развитие радиосекстан получил в разработанном ЦНИИ «Электроприбор» под руководством М. К. Петушкова радиооптическом секстане перископного типа «Сайга». Он обеспечивал автоматическое измерение с требуемой точностью высот и азимутов Солнца и Луны в двухсантиметровом диапазоне, а в ночное время – звезд в видимой области спектра.

Эффективное использование НК РПЛСН требует периодической коррекции вырабатываемых ими навигационных параметров. Поиском решения проблемы создания высокоточных глобальных средств коррекции с конца 1950-х годов занимались многие научные учреждения страны. В 1956 г. специалистами 9 НИИ ВМФ В. А. Фуфаевым, А. И. Гордеевым и Б. И. Цезаревичем была высказана идея использования искусственных спутников Земли (ИСЗ) для целей навигации [22].

Научные основы использования низкоорбитных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) для целей морской навигации были развиты в первой комплексной НИР «Спутник» (1958–1959 гг.), выполненной Институтом теоретической астрономии АН СССР[11)], Институтом электромеханики АН СССР[12)], Горьковским научно-исследовательским радиофизическим институтом[13)] совместно с рядом НИИ ВМФ, в том числе 9 НИИ ВМФ. В этой работе от 9 НИИ ВМФ активное участие принимали Л. И. Гордеев, В. П. Заколодяжный, Е. Ф. Суворов, В. Ф. Фуфаев и др. Таким образом, благодаря исследованиям, проводимым в конце 1950-х и начале 1960-х годов в институтах АН СССР, ВМФ и промышленности, был заложен фундамент создания отечественной спутниковой навигации – низкоорбитной СРНС.

[8)] В настоящее время ОАО «Трижды ордена Ленина Ленинградское оптико-механическое объединение имени В.И. Ленина» (ОАО «ЛОМО́»).

[9)] В настоящее время ОАО «Казанский оптико-механический завод».

[10)] Разработан в период 1956–1959 гг. НИИ-303 (ЦНИИ «Электроприбор») – главный конструктор С. Ф. Формаковский. Отличался от НК «Сила-Н» отсутствием планшета и прибора сигнализации. Был установлен на ПЛ пр. 644 с двумя пусковыми установками крылатых ракет П-5, расположенных на двух внешних ракетных контейнерах.

[11)] Реорганизован в 1998 году – вошёл в состав Института прикладной астрономии РАН.

[12)] С 2005 г. – ОАО «НИИЭлектромаш».

[13)] В настоящее время ФГУП «Научно-исследовательский радиофизический институт».

23 ноября 1967 г. первый навигационный ИСЗ «Космос-192» («Циклон») был выведен на орбиту. Председателем государственной комиссии по запуску спутника был назначен контр-адмирал Ю. И. Максюта – начальник 9 НИИ МФ. Непосредственной разработкой первой советской СРНС занимались: Красноярское КБ прикладной механики[14)] (головная организация, руководители М. Ф. Решетнев и Г. М. Чернявский), Московское НИИ приборостроения (руководители М. И. Борисенко и Н. Е. Иванов), Ленинградский научно-исследовательский радиотехнический институт[15)] (руководители В. П. Дмитриев и А. Ф. Смирновский) и др. В научных разработках активно участвовали 9 НИИ ВМФ и Ленинградская высшая военно-инженерная академия МО СССР.

В конце 1960-х годов возникла идея расширения возможностей СРНС для навигационного обеспечения высокодинамичных объектов и повышения ее оперативности и точности. Учеными институтов АН СССР, ВМФ и промышленности в 1968–1969 гг. были обоснованы возможность и целесообразность создания единой (глобальной) СРНС для воздушных, морских, наземных и космических объектов.

Работы по созданию глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС) были развернуты в 1970-е годы.

12 октября 1982 г. ознаменовался запуском первого космического аппарата ГЛОНАСС («Космос-1413»), а первая очередь этой системы была сдана в эксплуатацию в 1993 г. Разработка ИСЗ и наземных систем ГЛОНАСС проводилась коллективами, руководимыми академиком М. Ф. Решетневым, Ю. Г. Гужвой, Л. И. Гусевым, А. Г. Геворкяном, Н. Е. Ивановым, В. Ф. Черемисиным, В. И. Ермоленко, В. Н. Казанцевым.

Практически одновременно с созданием ГЛОНАСС велись работы по разработке корабельной приёмной аппаратуры, в том числе для РПЛСН. К 1987 году такая аппаратура была создана и ею стали оснащаться все РПЛСН последних проектов. В создании аппаратуры потребителей различного назначения принимали участие коллективы, которыми руководили Р. И. Полонников, В. А. Салищев, Ю. М. Устинов.

В создании СНС принимали участие многие ученые и специалисты 9 НИИ ВМФ: Л. И. Гордеев, Е. С. Доведов, Ю. С. Дубинко, Э. А. Жижемский, В. П. Заколодяжный, Ю. И. Максюта, В. А. Монтелли, И. Ф. Суворов, В. А. Фуфаев и др. [23].

Участие сотрудников 9 НИИ ВМФ в развитии и освоении навигационных комплексов РПЛСН шло параллельно с разработкой в институте соответствующих методических и руководящих документов по боевому использованию рассматриваемых комплексов. Одним из первых методических документов, разработанных в 9 НИИ ВМФ и изданных в 1963 г. Управлением гидрографической службы ВМФ[16)], было «Руководство по кораблевождению подводных лодок при подлёдном плавании в Арктическом бассейне». В нём впервые систематизированы необходимые штурманам данные для навигационного обеспечения подледного плавания ПЛ в районах Северного полюса и подробно изложены основы

[14)] В настоящее время АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.
[15)] В настоящее время Российский институт радионавигации и времени (РИРВ).
[16)] В 1967 г. переименовано в Гидрографическое управление МО СССР, с 1972 г. – в Главное управление навигации и океанографии МО СССР, с 1992 г. – в Главное управление навигации и океанографии МО РФ, с 2006 г. – в Управление навигации и океанографии МО РФ.

кораблевождения в высоких широтах. В разработке Руководства принимали участие Л. В. Вайсман, А. П. Князев, Д. А. Мамонов, В. А. Масленников, В. А. Монтелли, Л. К. Овчинников, А. Г. Светлов, А. А. Сорокин, А. В. Федотов (руководитель работ) и др. Капитальным трудом явились изданные в 1966 г. «Правила определения маневренных элементов подводных лодок и надводных кораблей ВМФ» (ПОМЭК-65), разработанные сотрудниками 9 НИИ ВМФ П. П. Скородумовым и А. А. Сорокиным. В последующем сотрудниками института В. К. Гараниным, Л. А. Зайцем, Д. Л. Ильиным были разработаны новые Правила определения маневренных элементов кораблей ВМФ (ПОМЭК-85) [24].

Опыт создания и эксплуатации технических (бортовых) средств навигации и принятие их на вооружение РПЛСН показали, что для их эффективного использования требуется разработка специальных регламентирующих документов – методик, руководств, правил. В частности, можно отметить разработку целой серии «Правил штурманской службы» (ПШС), регламентирующих вопросы навигационного обеспечения оружия и использование в этих целях новых НК. В 9 НИИ ВМФ были изданы ПШС по использованию практически всех НК подводных ракетоносцев. Здесь можно отметить вклад в разработку ПШС таких сотрудников института, как К. Я. Богомазов, П. Г. Бродский, А. П. Веселкин, В. К. Горанин, В. Г. Дзюба, Г. И. Емельянцев, В. Б. Жиляев, Л. А. Заяц, Н. И. Казбан, В. А. Монтелли, И. Н. Москвичев, В. В. Петухов, Н. Н. Пирогов, Ю. Н. Пленицын, А. А. Сорокин, Д. В. Теплов, Ю. Г. Хлыпало, А. А. Хребтов, В. В. Черневец и др.

Создание корабельных (бортовых) средств навигации РПЛСН первых поколений было тесно связано с исследованиями в области методов комплексной обработки навигационной информации.

В заключение хотелось бы отметить, что в результате большой и плодотворной деятельности 9 НИИ ВМФ и его сотрудников при поддержке ГУНиО МО, а в последующем УНиО МО РФ, совместно с промышленностью в период создания и становления Морских стратегических ядерных сил удалось обосновать и решить ряд крупных научно-технических проблем в части:

– создания корабельных инерциальных навигационных систем;
– разработки и внедрения спутниковых навигационных систем;
– создания и внедрения доплеровских гидроакустических лагов.

В целом результаты деятельности 9 НИИ ВМФ на рассматриваемом периоде времени позволили создать научно-технический задел, определить дальнейшие перспективы Института как в области решения задач НГО МСЯС, так и НГО морской оборонной и экономической деятельности Российской Федерации в Мировом океане в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Князев А. П. Из истории создания первых отечественных навигационных комплексов // Записки по гидрографии. – 1997. – № 241. – С. 80–90.
2. Алексеев С. П. Роль и место ГНИНГИ Минобороны России в решении задач навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности Российской Федерации (к 70-летию ГНИНГИ МО РФ) // Навигация и гидрография. – 1996. – № 27. – С. 9–19.
3. Библиографический справочник Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института Министерства обороны Российской Федерации. Составитель А. В. Федотов. – СПб.: ГНИНГИ МО РФ, 1998. – 139 с.

4. 290 лет верности Отечеству и заданному курсу! [Электронный ресурс] : статья. – Электрон. дан.: Открытое акционерное общество «Штурманские приборы». – Код доступа: www.navydevices.ru.
5. НИИ-944 [Электронный ресурс]: информационное сообщение. – Электрон. дан.: ВикипедиЯ: свободная энциклопедия. – Код доступа: ru-wiki.ru.
6. НПП «Далга» [Электронный ресурс]: информационное сообщение. – Электрон. дан.: Министерство оборонной промышленности Азербайджанской Республики. – Код доступа: www.mdi.gov.az.
7. ЦНИИ «Электроприбор» [Электронный ресурс]: информационное сообщение. – Электрон. дан.: CUTYWALLS: Архитектурный сайт Санкт-Петербурга. – Код доступа: www.cytywalls.ru.
8. Федотов А. В. Из истории Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института МО РФ // Навигация и гидрография. – 1995. – № 1. – С. 117–121.
9. Алексеев С. П. Об интеграции информационного обеспечения задач навигации, стабилизации и управления движением морских подводных объектов // Навигация и гидрография. – 1996. – № 2. – С. 73–76.
10. Богомазов. К. Я. Освоение навигационных комплексов на подводных лодках Северного флота. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2011. – 317 с.
11. Лаврентьев А. В., Майгов А. В., Титлянов В. А., Яценко С. В. Развитие навигационных комплексов кораблей ВМФ // Навигация и гидрография. – 1998. – № 7. – С. 75–83.
12. Макода В. С. , Федотов А. В. 69-летие Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института Министерства обороны Российской Федерации // Навигация и гидрография. – 1998. – № 7. – С. 117–121.
13. ОАО ЦНИИ «Дельфин» [Электронный ресурс]: информационное сообщение. – Электрон. дан.: ОАО ЦНИИ «Дельфин». – Код доступа: www.nidelfin.ru.
14. Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения» [Электронный ресурс]: информационное сообщение. – Электрон. дан.: НИИП. – Код доступа: www.cytywalls.ru.
15. Емельянцев Г. И., Г.А. Левит. Создание и дальнейшее развитие отечественных корабельных инерциальных навигационных систем // Навигация и гидрография. – 1998. – № 7. – С.79–83.
16. Пешехонов В. Г. Проблемы подводной навигации. Раздел в монографии «Роль российской науки в создании отечественного подводного флота (под общ. ред. акад. А. А. Саркисова). – М.: Наука, 2008. – С. 383–390.
17. Малеев П. И. Научные связи Института с организациями Академии наук и высшими учебными заведениями // Навигация и гидрография. – 1998. – № 7. – С. 25–29.
18. К 55-летию ЦНИИ «Морфизприбор» [Электронный ресурс]: статья. – Электрон. дан.: KORABEL.RU. – Код доступа: www.korabel.ru.
19. Пешехонов В.Г. Тенденция развития отечественных перископных комплексов и астрокорректоров подводных лодок. Раздел в монографии «Роль российской науки в создании отечественного подводного флота (под общ. ред. акад. А. А. Саркисова). – М.: Наука, 2008. – С. 391–394.
20. Казанский оптико-механический завод [Электронный ресурс]: статья. – Электрон. дан.: ВикипедиЯ: свободная энциклопедия. – Код доступа: www. korabel.ru.
21. ЛОМО [Электронный ресурс]: статья. – Электрон. дан.: ВикипедиЯ: свободная энциклопедия. – Код доступа: www.korabel.ru.
22. Суворов Е. Ф. Летопись зарождения, развития и первых шагов реализации идеи отечественной спутниковой системы. – М.: Кучково поле, 2014. – 232 с.
23. Заколодяжный В. П., Пантелеев В. М. Радионавигационные средства определения места и тенденций их развития // Морской сборник / ВМФ. – М., 1995. – № 6. – С 66–69.
24. Леденёв Н. И. Роль научно-исследовательского управления навигации ГНИНГИ в создании морских средств навигации для кораблей ВМФ // Навигация и гидрография. – 2014. – Юбилейный выпуск, посвящённый 75-лению Института. – С. 16–23.

DEVELOPMENT OF NAVIGATION COMPLEXES MISSILE SUBMARINES OF STRATEGIC IN THE PERIOD OF CREATION AND FORMATION OF NAVAL STRATEGIC NUCLEAR FORCES

A. I. Ismailov («GNINGI» JSC)

The history of formation and development of technical (onboard) navigation means missile submarines of strategic is considered. The place and role of 9 *research institute of the Navy and its employees in the creation and development of navigation systems for underwater missile carriers is shown.*

УДК 359/527

Памяти сотрудников АО «ГНИНГИ» – первопроходцев в области НГО ракетных подводных лодок стратегического назначения

НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАКЕТНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК СТРАТЕГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ПЕРИОД СОЗДАНИЯ И СТАНОВЛЕНИЯ МОРСКИХ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ СИЛ

А. И. ИСМАИЛОВ
(АО «ГНИНГИ»)

Дан ретроспективный анализ развития технических (бортовых) средств навигации ракетных подводных лодок стратегического назначения. Показаны место и роль 9 *НИИ ВМФ и его сотрудников в навигационно-гидрографическом обеспечении создания и становления Морских стратегических ядерных сил Российской Федерации.*

С началом создания ракетно-ядерного флота в Союзе Советских Социалистических Республик специалисты, участвующие в создании ракетного оружия морского базировании, понимали важность эффективного навигационно-гидрографического обеспечения (НГО) боевого применения ракетных подводных лодок стратегического назначения (РПЛСН). Это определялось тем, что условия проведения стрельб баллистическими ракетами стратегического назначения (БРПЛ) с подводных лодок (ПЛ) существенно отличаются от условий стрельбы с наземных пусковых установок. Наземная пусковая установка неподвижна или мало подвижна. Её исходные параметры географической ориентации в момент пуска ракеты могут быть надежно и с высокой точностью определены с использованием государственной геодезической сети. При этом работы по привязке начальных условий старта к осям избранной для стрельбы системы координат, как правило, выполняются заблаговременно.

ПЛ, имеющая на вооружении ракетное оружие (РО), является движущейся и качающейся платформой. Чтобы определить исходные параметры ориентации баллистических ракет подводных лодок в момент пуска, необходимо с высокой

точностью определять текущие координаты места, поправку курса, скорость хода ПЛ относительно Земли, углы качки пусковых столов относительно истинного горизонта и ряд других специфических навигационных, гидрографических и геофизических параметров, необходимых для работы системы управления ракетами.

Следует отметить, что на первых этапах развития БРПЛ с дальностью стрельбы до 1000 км, использование ракетного оружия с достаточной степенью точности обеспечивалось традиционными средствами навигации. Вследствие этого первые указания по навигационному обеспечению ракетных стрельб ПЛ по береговым целям были определены в 1960-х годах в Правилах ракетной стрельбы (ПРС) без участия штурманов и гидрографов. Раздел этих Правил, посвященный навигационному обеспечению, имел ряд неточностей и принципиальных ошибок. Поэтому большинство первых ракетных пусков по береговым целям имели значительные отклонения от точки прицеливания.

Для устранения отмеченных недостатков осенью 1961 г. в 28 научно-исследовательском институте (НИИ) ВМФ[1)] состоялся сбор флагманских специалистов ракетных служб флотов под руководством начальника Управления ракетно-артиллерийского вооружения (УРАВ) ВМФ вице-адмирала А. В. Сычева. На этот сбор были приглашены военно-морские специалисты в области навигации и гидрографии. С докладом от 9 НИИ ВМФ[2)] по проблемам навигационно-гидрографического обеспечения ракетных стрельб выступил капитан 2 ранга А. В. Федотов. По результатам сбора было дано поручение 28 и 9 НИИ ВМФ в кратчайшие сроки подготовить предложения по корректуре ПРС и издать методику по НГО ракетных стрельб с ПЛ по береговым целям. В короткие сроки (менее 3 месяцев) Гидрографической службой (ГС) ВМФ были изданы первые специальные методические документы по НГО ракетных стрельб, которые в начале 1962 г. поступили на флоты. В разработке документов, которые в дальнейшем использовались для корректуры ПРС, приняли участие: В. А. Монтелли, Л. К. Овчинников, А. В. Федотов (9 НИИ ВМФ), Г. Ф. Краснов и О. В. Тарасов (28 НИИ ВМФ).

Эти методические документы заложили основу взаимодействия специалистов Гидрографической службы ВМФ и Управления ракетно-артиллерийского вооружения (УРАВ) ВМФ в области развития отечественной морской стратегической системы. С 1962 г. представители ГС ВМФ и, в первую очередь, 9 НИИ ВМФ приглашались практически на все совещания и сборы специалистов РО флотов, участвовали в комиссиях по анализу неудачных пусков ракет, что позволяло оперативно решать все возникшие проблемы. Начальник 9 НИИ ВМФ был постоянным членом научно-технического совета 28 НИИ ВМФ и участвовал в рассмотрении основных этапов проектирования нового оружия для ВМФ. Участие специалистов по навигации и гидрографии в процессе создания РО позволило

[1)] 1 января 1999 г. вошёл в состав 1 ЦНИИ МО РФ (в настоящее время – Научно-исследовательский институт (кораблестроения и вооружения ВМФ) Федерального государственного казённого военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г Кузнецова» (НИИ КиВ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»)

[2)] С 19 июня 1994 г. – Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт (ГНИНГИ) Минобороны России, в последующем – ФГУП «ГНИНГИ МО РФ». В 2009 г. в соответствии с приказом МО РФ от 15 июня 2009 г. № 1359 преобразован в Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт» (АО «ГНИНГИ»).

своевременно активировать планы создания новых технических средств навигации и планировать изучение Мирового океана в интересах Морских стратегических ядерных сил (МСЯС).

Особенностью развития отечественного ракетного оружия морского базирования являлось то, что совершенствование их тактико-технических характеристик (ТТХ) шло опережающими темпами по сравнению с возможностями НГО ракетных стрельб. Быстро растущие требования к номенклатуре необходимых навигационных параметров и к их характеристикам требовали нетрадиционных подходов к развитию средств и методов НГО ракетного оружия, поиска новых технологий решения навигационных задач.

Одним из направлений таких решений стало создание навигационного комплекса с инерциальной навигационной системой (ИНС) [1, 2].

Необходимость создания ИНС определялась тем, что установленные на первых отечественных подводных ракетоносцах навигационные комплексы (НК) «Плутон» и «Сигма» не в полной мере отвечали требованиям ракетного оружия. Так, НК «Плутон», который разрабатывался для многоцелевых ПЛ, имел большие погрешности по точности курсоуказания, а НК «Сигма» для достижения требуемой точности стрельбы требовал проведения предстартовой обсервации с помощью астронавигационной системы. Расчёт параметров астрономической обсервации производился вручную и требовал относительно большого времени, что увеличивало период предстартовой подготовки и резко снижало скрытность ракетной подводной лодки стратегического назначения (РПЛСН). Вероятность астрономической обсервации была низкой, и не всегда была возможность предстартового уточнения координат места и поправки курса.

Уже первые исследования по созданию ИНС показали необходимость создания высокоточных гироскопов. Для решения данной проблемы в 9 НИИ ВМФ по инициативе В. Д. Теплова, Е. А. Ананченко и Г. А. Левита в 1961 г. при отделении технических наук Академии наук СССР был организован научный Совет (далее – Совет) по проблеме «Научные основы построения систем навигации и автоматических устройств с применением новых физических явлений». Руководителем Совета был назначен академик АН СССР Б. Н. Петров. С 1962 г. активное участие в работе совета стал принимать П. И. Малеев. При Совете было создано 10 секций (по числу известных к тому времени новых для гироскопии физических явлений) и открыта по этим направления комплексная научно-исследовательская работа (НИР) с шифром «Вига». К работам по частным тактико-техническим заданиям (ТТЗ) данной НИР были привлечены ряд институтов АН СССР, вузов и научно-исследовательских организаций промышленности [3]. Результаты НИР «Вига» позволили определить наиболее перспективные направления развития гироскопических чувствительных элементов.

Одновременно с участием в НИР «Вига» в 9 НИИ ВМФ в 1965 г. была создана группа из ведущих специалистов института под руководством Е. А. Ананченко для выявления возможных путей использования новых физических явлений и эффектов для создания средств навигации, обладающих не только высокой точностью определения основных навигационных параметров, но и скрытностью их использования. В указанную группу ведущих специалистов входили Г. А. Левит, П. И. Малеев, А. В. Федотов и др. [4].

Определённую роль в развитии отечественной гироскопии, а следовательно, НК сыграл подготовленный в конце 1960-х годов П. И. Малеевым курс лекций по теме «Новые типы гироскопов», неоднократно прочитанный им студентам Ленинградского института точной механики и оптики. В 1971 г. была издана монография под этим названием, которая в последующем была переиздана в ряде зарубежных государств, в том числе в Китае.

Разработка первого советского инерциального комплекса «Тобол», который предназначался для установки на атомные подводные крейсера с баллистическими ракетами (АПКР) проекта (пр.) 667А по ряду причин затянулась, и только в 1966 г. был защищен технический проект НК, а головная ПЛ должна была вступить в строй в 1967 г.

После защиты технического проекта НК «Тобол» стало ясно, что рабочее проектирование и испытания его головного образца займут немало времени, и поставка его на головную АПКР пр.667А не может быть осуществлена в заданные сроки. Остро встал вопрос об обеспечении испытаний корабля и оружия в назначенные сроки – во второй половине 1967 г.

По заданию Главного штаба (ГШ) ВМФ 9 НИИ ВМФ выполнил проработку по оценке возможности замены НК «Тобол» на НК «Сигма» на головной АПКР пр. 667А. Аналогичная оценка была выполнена в Ленинградском научно-производственном объединении (ЛНПО) «Азимут»[3)]. При этом для проведения испытаний ракетного оружия необходимо было обеспечить точность определения координат места и курса в условиях оборудованного полигона в восемь раза выше, чем точности, гарантированные техническими условиями на НК «Тобол». По определению координат места проблем не возникало, так как высокие точности могли быть получены с использованием высокоточных средств коррекции в районе испытательного полигона, что касается определения курсоуказания, то специалисты ВМФ и промышленности не находили путей достижения требуемых точностей. Время шло, корабельные испытания ракетного оружия были под угрозой срыва. Руководство ВМФ приняло решение установить на головной корабль пр. 687А НК «Сигма» для обеспечения испытаний корабля и ракетного оружия с последующей заменой установленного НК на НК «Тобол».

Главный конструктор НК «Сигма» В. И. Маслевский категорически отказался от доработки НК «Сигма» в интересах получения точностей курсоуказания, необходимых для испытаний ракетного оружия. Положение казалось безвыходным. В этих условиях специалистами Гидрографической службы ВМФ и 9 НИИ ВМФ было принято решение взять на себя ответственность за обеспечение испытаний на головном подводном ракетоносце пр. 667А и попытаться достигнуть требуемых точностей не техническими, а методическими путями. Такое решение было небезосновательным, так как к этому времени имелся значительный опыт по навигационному обеспечению стрельб с ПЛ по береговой цели крылатыми ракетами П-5Д с использованием НК «Сила Н», «Север Н-844» и баллистическими ракетами Д-2 с использованием НК «Плутон-629» и «Сигма-658М».

В 9 НИИ ВМФ группа специалистов под руководством А. В. Федотова и В. А. Масленникова создала первые нормативно-методические документы по навигационному обеспечению стрельб по береговой цели крылатыми ракетами с

[3)]В настоящее время – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Государственный научный центр РФ.

использованием НК «Сила Н» и «Север Н». При этом учитывался опыт аналогичных работ на НК «Плутон».

Основой всех разработанных методик был анализ графиков разностей курса между гирокомпасами и гироазимутами, который позволял с достаточно высокой точностью определять и прогнозировать скорость ухода гироазимутов и после разового определения поправки курса получать необходимые точности курсоуказания, выдаваемого в ракетный комплекс в течение нескольких (до двух – трех) часов после обсервации. Определение уходов гироазимутов требовало выдерживать постоянный курс, скорость хода ПЛ в течение 9 часов. Ведение графиков разности курсов усложняло работу штурманов. Попытки автоматизировать процесс ведения графиков результатов не дали. Эта работа требовала особых навыков и определенного искусства и, надо отметить, что большинство штурманов РПЛСН быстро ее освоили. Эта методика в 1966 г. была защищена авторским свидетельством № 35824, в состав авторского коллектива входили П. С. Волосов, В. Г. Грабов, В. А. Масленников, В. А. Монтелли, А. В. Федотов.

В своей научно-практической деятельности сотрудники 9 НИИ ВМФ тесно взаимодействовали с такими специалистами штурманских и гидрографических служб флотов, как А. Н. Яковлев, Д. Э. Эрдман, П. П. Бурсевич, В. П. Деменцев, М. П. Лузин, В. В. Владимиров и многими другими флагманскими штурманами соединений и штурманами ПЛ.

Разработка методики НГО и гидрометеорологического обеспечения (ГМО) испытаний ракетного оружия на головном АПКР пр. 667А была поручена группе специалистов под руководством одного из ведущих специалистов 9 НИИ ВМФ В. Н. Фрадкина. Группа приступила к работе со второй половины 1968 года.

На основе имевшегося опыта НГО ракетных стрельб было принято решение попытаться выявить тонкую структуру погрешностей, присущих каждому конкретному образцу НК «Сигма», и тем самым повысить точности обеспечения ракетного оружия необходимыми навигационными данными по сравнению с точностями, гарантированными техническими условиями (ТУ) на данный тип навигационного комплекса. При этом требовалось вести работы по нескольким основным направлениям [5, 6]:

– обеспечить требуемую точность выработки координат места и курса на момент пуска каждой практической ракеты;

– обеспечить разделение погрешностей навигационных данных стрельбы и технического рассеивания ракетного комплекса (РК) по данным предстартового и после стартового контроля;

– обеспечить требуемую точность привязки измерительных систем НК к диаметральной плоскости РПЛСН (требовалось повысить точность в 3–5 раз по сравнению с точностью, гарантированной ТУ на навигационный комплекс).

Был развернут широкий фронт работ по всем направлениям. В работе деятельно участвовали специалисты Северного флота. Основные усилия были направлены на повышение точности измерительных устройств (репитер 19с) и на совершенствование методики обработки разностей курсов. После проведения экспериментов в Методику НГО испытаний ракетного оружия был внесен ряд рекомендаций по дополнительным регламентным работам для определения поправок приборов, которых не было в технической документации на комплекс, и за проведение которых промышленность не брала на себя ответственность. Но именно

эти дополнительные регламентные работы и определяемые с их помощью поправки приборов сыграли решающую роль в достижении требуемых для испытания ракетного оружия точностей.

Была существенно доработана методика обработки графиков разностей курсов. В результате обработки около 400 практических реализаций разностей курсов с привлечением штурманов подводных ракетоносцев и курсантов штурманского факультета Высшего военно-морского училища им. М. В. Фрунзе были установлены закономерности осреднения нерегулярных колебаний, выведены математические выражения для этих закономерностей и разработаны практические рекомендации для штурманов РПЛСН. Это позволило сократить время подготовки системы курсоуказания с 9 до 3 часов. Кроме того были разработаны и проверены на практике новые способы использования разностей курсов:

– определения момента нарушения стабильности ухода гироазимутов (что важно при проведении предстартовой подготовки ракет);
– определения номера гироазимута, у которого изменился уход;
– определения нового значения ухода сразу же после отклонения гироазимута с нестабильным уходом.

Эти усовершенствования пригодились как при проведении испытаний головного АРКР пр.667А, так и в ходе боевой службы ПЛ этого проекта. Указанные работы в условиях крайне сжатых сроков ввода АПКР пр. 667А в состав ВМФ были проведены за несколько месяцев,

Головной подводный ракетоносец уже находился в доке, и нужно было решить проблему привязки измерительных средств НК к диаметральной плоскости ПЛ. Осенью 1966 г. методика этой привязки была создана, согласована с головной организацией по системам прицеливания (Конструкторское бюро (КБ) «Арсенал», г. Киев). Методика гарантировала точность привязки в 2 угловые минуты, что было в 3 раза выше точности, гарантированной по ТУ на НК.

Каждое положение Методики НГО испытаний ракетного оружия проверялось на практических ракетных стрельбах АПРК пр. 658М. Специалисты из группы В. Н. Фрадкина участвовали во всех мероприятиях флота, связанных с ракетными стрельбами ПЛ по береговым целям. Здесь можно отметить такой факт – с момента внедрений предложений 9 НИИ ВМФ на Северном флоте (СФ) практически прекратились неудовлетворительные оценки по обеспечению пусков ракет по вине штурманских боевых частей РПЛСН [7].

Весной 1967 года была закончена разработка Методики обеспечения испытаний головной АПКР пр. 667А. Все положения Методики были проверены на практических ракетных стрельбах и одобрены специалистами СФ.

В июне 1967 года в Научно-исследовательском институте автоматики (НИИА, г. Свердловск)[4)] было проведено совещание представителей ВМФ и организаций промышленности по рассмотрению и согласованию вопросов разделения погрешностей стрельбы, выраженных в отклонениях БРПЛ от точки прицеливания за счет ошибок ракетного и НК РПЛСН.

На совещании была разработана инструкция по вопросу разделения погрешностей стрельбы БРПЛ. На этом подготовку документов по обеспечению испытаний головного апкр пр. 667А и их практическую проверку можно было

[4)] В настоящее время ФГУП «НПО Автоматики имени академика Н. А. Семихатова», г. Екатеринбург.

считать законченной. Однако у руководства ВМФ оставалась серьезная озабоченность вопросами боевого использования ракетного оружия с ракетных ПЛ данного проекта. Создание НК «Тобол» задерживалось. Теперь даже при самом благополучном стечении обстоятельств НК «Тобол» мог быть установлен лишь на 14-й по счету корабль. Альтернативных вариантов не было и было принято совместное решение ВМФ и Министерства судостроительной промышленности СССР об установке на 2-й и последующие АПКР пр. 6б7А НК «Сигма», несмотря на то, что это несколько снижало боевые возможности новейших подводных ракетоносцев. Чтобы хотя бы немного повысить возможности НК «Сигма» по точности счисления координат места, было принято решение включить дополнительно в состав НК гидроакустический абсолютный лаг (ГАЛ) «ЛА-1» для измерения скорости хода ПЛ относительно Земли. Лаг «ЛА-1» начал устанавливаться на все АПКР пр. 667А, начиная с 6-го по счету корабля.

Параллельно с разработкой Методики обеспечения испытаний ракетного оружия в 9 НИИ ВМФ осуществлялась разработка нормативно-методических документов по навигационному обеспечению боевых и практических ракетных стрельб. К середине 1967 года проекты документов под шифрами «РНОС-1-69» и «ППСНК-1-69» были разработаны и разосланы на флоты и в заинтересованные организации промышленности. Одним из наиболее важных достижений при разработке этих документов было предложение о подготовке НК к обеспечению стрельбы не после получения сигнала боевого управления, а заблаговременно, к каждому очередному сеансу связи с пунктом управления.

В ходе патрулирования на РПЛСН всеми возможными методами моделировалась выработка требуемых навигационных параметров, и периодически с помощью средств коррекции определялись поправки к выработанным данным, и вносилась корректура в выработку навигационных параметров. Это, казалось бы, очень простое предложение сразу повысило готовность корабля к стрельбе с 6 часов до 1 часа, что было большим достижением, хотя и в значительной мере усложнило маневрирование РРЛСН при боевом патрулировании. В конце 1967 г. были проведены испытания ракетного оружия на головном подводном ракетоносце пр. 667А. Испытания прошли успешно. Следует отметить, что во время испытаний, а они проводились в сложных гидрометеорологических условиях осеннего времени, впервые была осуществлена стрельба с учётом поправок курсоуказания, полученных за счёт использования радиосекстана.

Разработанные в 9 НИИ ВМФ с участием специалистов флота нормативно-методические документы по НГО ракетных стрельб сыграли большую роль в обеспечении боевой и повседневной деятельности подводных ракетоносцев, штабов соединений и объединений. Они использовались в качестве единственных, в то время, учебных пособий в учебных заведениях ВМФ.

Задача обеспечения испытаний БРПЛ была выполнена, однако, по-прежнему, оставались проблемные вопросы НГО боевого применения БР ракетных ПЛ и, в частности, с использованием ИНС. В июне 1967 г. противниками инерциальной навигации была предпринята очередная попытка сорвать создание НК с ИНС [8, 9]. В частности, было выдвинуто предложение прекратить разработку НК «Тобол», модернизировать НК «Сигма» и таким образом решить проблему боевого использования ракетного оружия на АПКР пр. 667А. Для рассмотрения этого предложения была создана межведомственная комиссия с участием 31 организаций,

в том числе, и от Научно-технического комитета (НТК) Генерального штаба Вооруженных сил СССР. Руководил совещанием заместитель начальника 9 НИИ ВМФ В. Д. Теплов. После внимательного рассмотрения всех предложений комиссия однозначно высказалась за продолжение создания НК «Тобол». Были приняты меры по оказанию помощи НИИ штурманского приборостроения «Дельфин»[5)] в создании ИНС для РПЛСН. Но время было упущено, и НК «Тобол» с ИНС был установлен лишь на 19-м по счёту АПКР пр. 667А. Появление НК «Тобол» резко повысило эффективность НГО применения ракетного оружия, уменьшилась нагрузка на штурманов, повысилась боевая готовность корабельных ракетных комплексов стратегического назначения (КРК СН) подводных ракетоносцев. Сотрудниками 9 НИИ ВМФ А. П. Бурсевичем, В. Н. Фрадкиным, Ю. А. Стецуном и Е. Н. Кореневым совместно с флагманским штурманом соединения РПЛСН Северного флота В. В. Владимировым были разработаны «Правила пользования навигационных комплексов «Тобол» для обеспечения ракетных стрельб». В то же время возникла проблема быстрой переподготовки специалистов флота для освоения нового НК. Здесь большую роль сыграли кафедра технических средств кораблевождения ВВМУ им М.В. Фрунзе во главе с А. В. Лаврентьевым, который организовал курсы по переподготовке специалистов флота, а также Учебный центр ВМФ в г. Палдиски (Эстонская ССР), где готовились экипажи кораблей. Лекции по вопросам технического устройства НК читали преподаватели военно-морских учебных заведений [10].

В ВВМУ им М. В. Фрунзе и Учебном центре ВМФ в г. Палдиски цикл лекций по вопросам взаимодействия НК и КРК СН подводных ракетоносцев, а также боевого использования НК в ВВМУ читал сотрудник 9 НИИ ВМФ В. Н. Фрадкин [11].

В 9 НИИ ВМФ все работы по созданию нормативно-методических документов в области НГО РПЛСН проводились в отделе, руководимым А. В. Федотовым. Руководителями этих работ были Е. Н. Коренев, Б. И. Поддубный, Ю. А. Стецун, В. Н. Фрадкин. Специалисты 9 НИИ ВМФ принимали активное участие во всех крупных учениях флотов. Такое тесное взаимодействие флотов и 9 НИИ ВМФ было обусловлено необходимостью постоянного отстаивания интересов НГО. Неизбежность межведомственных споров была вызвана самой системой раздельного предъявления требований к ракетному оружию и навигации. Поэтому при любых конфликтных ситуациях начинались поиски виновных, и специалисты по НГО, как правило, оказывались обороняющейся стороной. К чести специалистов штурманских боевых частей РПЛСН следует отметить, что неудачные практические пуски БРПЛ по вине штурманских боевых частей были в эти годы чрезвычайно редки, как правило, оценка работы штурманов была высокой.

В рассматриваемые годы БРПЛ развивались очень быстро, в какой-то мере это ускорило параллельное развитие средств навигации. ЦНИИ «Дельфин» стал монополистом в разработке навигационных комплексов для подводных ракетоносцев. На каждом новом проекте РПЛСН устанавливалась новая модификация НК «Тобол». Повысились ТТХ инерциальных навигационных систем, повысился уровень автоматизации НК. На этом этапе было важно обеспечить высококачественное проектирование НК РПЛСН, особенно на ранних стадиях разработки, принимались решения по идеологии создания НК нового типа [12].

[5)] В настоящее время АО «ЦНИИ «Дельфин».

В первой половине 1970-х годов были созданы БРПЛ с астрокоррекцией [13–16]. Казалось бы, что это должно было снизить требования к НГО боевого применения этих ракет. Действительно, наличие астрокоррекции в системе управления (СУ) БРПЛ на порядок снижало требования к точности выработки координат места, но в действительности на порядок возросли требования к точности в НК значений абсолютной скорости хода, наклонения горизонта, углов качки и др. Для выработки требуемых значений указанных параметров потребовалась высокая точность определения курса и скорости хода РПЛСН. Так что снижение требований к НК оказалось призрачным. Для каждого нового типа НК требовались инерциальные системы все более высокой точности.

При наличии астрокоррекции в СУ БРПЛ уже невозможно было предъявлять требования к точности стрельбы раздельно для ракетного и навигационного комплексов. В этих условиях все большее значение приобретало непосредственное взаимодействие разработчиков ракетного оружия и средств НГО. Специалисты ЦНИИ «Дельфин» во главе со своим ведущим конструктором О. В. Кищенковым успешно взаимодействовали с разработчиками БРПЛ.

В создании новых модификаций НК типа «Тобол» и его чувствительных элементов активно участвовали такие сотрудники 9 НИИ ВМФ, как С. Н. Долгих, Ю. Н. Пленицын, И. А. Кукулевский, Е. Н. Коренев, П. И. Малеев и др., а в освоении этих НК большую роль сыграли флагманские штурманы Ю. Г. Хлыпало, А. И. Политаев, В. К. Иванов и многие штурманы РПЛСН [17–19].

В этот период времени к процессу освоения новых навигационных комплексов активно подключились специалисты Военно-морской академии (ВМорА) и Высших специальных офицерских классов (ВСОК) ВМФ, где готовили специалистов штурманской специальности, но непосредственной подготовкой экипажей новых РПЛСН, специалистов штабов и ГС флотов по-прежнему занимались Учебный центр ВМФ в г. Палдиски и 9 НИИ ВМФ.

Начало 1970-х годов было знаменательно еще одним событием. В 1972 появились первые сообщения о разработке в США нового типа морских стратегических ракет по программе «Трайдент-1». В середине 1972 г. вышло Постановление Центрального Комитета Коммунистической партии Советского Союза и Совета министров СССР о необходимости разработки в СССР стратегического ракетного оружия морского базирования по программе «Тайфун» в противовес программе «Трайдент». В июне 1972 г. в головной организации навигационного приборостроения ЛНПО «Азимут» состоялось совещание специалистов по определению направленности работ для решения проблем программы «Тайфун» в части НГО БРПЛ. По поручению начальника Гидрографической службы ВМФ в совещании участвовали начальник 9 НИИ ВМФ Ю. И. Максюта и один из ведущих специалистов института В. Н. Фрадкин. Совещание рекомендовало провести конкурсную работу с участием ЛНПО «Азимут» и ЦНИИ «Дельфин» по определению возможного облика будущего НК для программы «Тайфун». В результате выполнения такой конкурсной работы были выданы тактико-технические задания (ТТЗ) на разработку НК «Симфония» в ЛНПО «Азимут» – основной вариант, и НК «Шлюз» в ЦНИИ «Дельфин» – резервный вариант.

Впервые в практике навигационного приборостроения в ТТЗ были отдельно выделены требования по НГО стратегического ракетного оружия. Главным

наблюдающим по НК «Симфония» от 9 НИИ ВМФ был назначен И. И. Тузов. Направление НГО БРПЛ курировал В. Н. Фрадкин, а в части создания ИНС – А. Ю. Морозов (с 1976 г. – Г.И. Емельянцев) и её гироскопов – П. И. Малеев [4]. В 1973 году началась разработка эскизного проекта, а в 1974 г. – технического проекта комплекса «Симфония» [20].

Особенно большие проблемы на начальном этапе разработки комплекса (1973 г.) возникли при согласовании требований к НК со стороны ракетного оружия. Для согласования требований ракетного оружия потребовалось создать Правительственную комиссию. Секцией согласования требований руководил талантливый конструктор и ученый, доктор технических наук, главный инженер ЛНПО «Азимут» В. Г. Гордеев. После длительных обсуждений требования ракетного оружия к навигации были согласованы. Согласование требований к НК «Шлюз» прошло более гладко. Рабочее проектирование обоих НК заняло длительное время. НК «Симфония» был принят на вооружение только в 1982 г., а НК «Шлюз» – в 1989 г. Сотрудниками 9 НИИ ВМФ И. Н. Москвичёвым, Ю. Г. Хлыпало, А. Н. Евдокимовым, Е. Ф. Даниловским совместно со штурманами Северного флота были разработаны правила использования НК «Симфония» и НК «Шлюз» [21].

В заключении можно отметить, что научно-производственная деятельность 9 НИИ ВМФ, научно-технический уровень его сотрудников позволили внести значительный вклад в решение задач НГО становления и развития Морских стратегических ядерных сил и их основной составляющей – РПЛСН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев С. П. Об интеграции информационного обеспечения задач навигации, стабилизации и управления движением морских подводных объектов // Навигация и гидрография. – 1996. – № 2. – С. 73–76.
2. 290 лет верности Отечеству и заданному курсу! [Электронный ресурс] : статья. – Электрон. дан.: Открытое акционерное общество «Штурманские приборы». – Код доступа: www.navydevices.ru.
3. Малеев П. И. Научные связи Института с организациями Академии наук и высшими учебными заведениями // Навигация и гидрография. – 1998. – № 7. – С. 25–29.
4. Библиографический справочник Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института Министерства обороны Российской Федерации. Составитель А. В. Федотов. – СПб.: ГНИНГИ МО РФ, 1998. – 139 с.
5. Князев А. П. Из истории создания первых отечественных навигационных комплексов // Записки по гидрографии. – 1997. – № 241. – С. 80–90.
6. Федотов А. В. Из истории Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института МО РФ // Навигация и гидрография. – 1995. – № 1. – С. 117–121.
7. НИИ-944 [Электронный ресурс]: информационное сообщение. – Электрон. дан.: ВикипедиЯ: свободная энциклопедия. – Код доступа: ru-wiki.ru.
8. Емельянцев Г. И., Г.А. Левит. Создание и дальнейшее развитие отечественных корабельных инерциальных навигационных систем // Навигация и гидрография. – 1998. – № 7. – С.79–83.
9. ОАО ЦНИИ «Дельфин» [Электронный ресурс]: информационное сообщение. – Электрон. дан.: ОАО ЦНИИ «Дельфин». – Код доступа: www.nidelfin.ru.
10. Лаврентьев А. В., Майгов А. В., Титлянов В. А., Яценко С. В. Развитие навигационных комплексов кораблей ВМФ // Навигация и гидрография. – 1998. – № 7. – С. 75–83.
11. Суворов Е. Ф. Летопись зарождения, развития и первых шагов реализации идеи отечественной спутниковой системы. – М.: Кучково поле, 2014. – 232 с.
12. НПП «Далга» [Электронный ресурс]: информационное сообщение. – Электрон. дан.: Министерство оборонной промышленности Азербайджанской Республики. – Код доступа: www.mdi.gov.az.

13. Заколодяжный В. П., Пантелеев В. М. Радионавигационные средства определения места и тенденций их развития // Морской сборник / ВМФ. – М., 1995. – № 6. – С 66–69.
14. Казанский оптико-механический завод [Электронный ресурс]: статья. – Электрон. дан.: ВикипедиЯ: свободная энциклопедия. – Код доступа: www. korabel.ru.
15. ЛОМО [Электронный ресурс]: статья. – Электрон. дан.: ВикипедиЯ: свободная энциклопедия. – Код доступа: www.korabel.ru.
16. Пешехонов В. Г. Проблемы подводной навигации. Раздел в монографии «Роль российской науки в создании отечественного подводного флота (под общ. ред. акад. А. А. Саркисова). – М.: Наука, 2008. – С. 383–390.
17. Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения» [Электронный ресурс]: информационное сообщение. – Электрон. дан.: НИИП. – Код доступа: www.cytywalls.ru.
18. Алексеев С. П. Роль и место ГНИНГИ Минобороны России в решении задач навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности Российской Федерации (к 70-летию ГНИНГИ МО РФ) // Навигация и гидрография. – 1996. – № 27. – С. 9–19.
19. Макода В. С. , Федотов А. В. 69-летие Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института Министерства обороны Российской Федерации // Навигация и гидрография. – 1998. – № 7. – С. 117–121.
20. Леденёв Н. И. Роль научно-исследовательского управления навигации ГНИНГИ в создании морских средств навигации для кораблей ВМФ // Навигация и гидрография. – 2014. – Юбилейный выпуск, посвящённый 75-лению Института. – С. 16–23.
21. Богомазов. К. Я. Освоение навигационных комплексов на подводных лодках Северного флота. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2011. – 317 с.

NAVIGATION AND HYDROGRAPHIC SUPPORT MISSILE SUBMARINES OF STRATEGIC IN THE PERIOD OF CREATION AND FORMATION OF NAVAL STRATEGIC NUCLEAR FORCES

A. I. Ismailov («GNINGI» JSC)

A retrospective analysis of the development of technical (onboard) means of navigation missile submarines of strategic is given. The place and role of 9 *research institute of the Navy and its employees in navigation and hydrographic support of creation and formation of Naval Strategic Nuclear Forces of the Russian Federation are shown.*

УДК 656.6.551.48

НОВЫЕ ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ ВЫСОКОТОЧНОЙ НАВИГАЦИИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

П. И. МАЛЕЕВ
(АО «ГНИНГИ»)

На основе анализа достижений последних лет в физике и ряде других областей науки выявлены эффекты, явления и поля, пригодные для создания новых высокоточных средств навигации морских объектов. Рассмотрены принципы устройств и работы таких средств. Оценены их ожидаемые точности и другие параметры. Проведен анализ состояния их разработок.

Средства навигации морских подвижных объектов достигли высокого уровня развития, однако постоянно растущие требования к ним диктуют необходимость поиска путей их дальнейшего совершенствования. История развития приборостроения свидетельствует о том, что создание более совершенных их образцов, возможно, в первую очередь, на основе достижений в физике и ряде других областей науки. Проведем выбор и анализ этих достижений, представляющих интерес для навигации морских объектов.

Основными направлениями развития современных средств навигации, в первую очередь для подводных лодок (ПЛ), является дальнейшее повышение их точности, скрытности работы и сокращения времени приведения в рабочее состояние. Поскольку точность средств навигации ПЛ (каким является их навигационный комплекс) определяется используемыми в их инерциальных системах (ИНС) гироскопами, рассмотрение вопроса целесообразно начать с анализа возможных путей создания новых типов высокоточных гироскопов. Проведенные исследования позволили выявить десять типов гироскопов, работающих на различных физических принципах, и более 50 их подтипов [1]. Из них лишь некоторые представляют интерес для решения проблемы дальнейшего существенного повышения точности средств навигации. Остановимся на их рассмотрении.

1. Новые типы высокоточных гироскопов

1.1 Сверхпроводящие гироскопы

К настоящему времени у сверхпроводящих материалов и приборов, созданных на их основе, выявлено около 30 своеобразных физических свойств [2]. Ряд из этих свойств представляет несомненный интерес и для решения проблем навигации, в частности, – для создания высокоточных гироскопов.

Перспективы использования сверхпроводимости в интересах средств навигации связаны, с одной стороны, с необходимостью поддержания устройств на их основе в условиях низких температур, что само по себе дает положительный эффект, а с другой – с уникальными эффектами и явлениями, которые наблюдаются лишь в этих условиях. Явление сверхпроводимости известно уже более 80 лет,

однако только в последние десятилетия начинает находить практическое применение. Особенно интенсивно работы в этом направлении стали проводиться с появлением в 1986 г. высокотемпературных сверхпроводников.

К настоящему времени наибольших успехов в создании сверхпроводящих гироскопов добились США [3]. Созданные ими сверхпроводящие гироскопы предназначались для проверки общей теории относительности. Их дрейф оказался на пять – шесть порядков меньшим, чем у лучших из существующих гироскопов (10^{-11} ^{0}/ч). Длительные (почти четыре года) испытания таких гироскопов в составе запущенного в космос специального аппарата подтвердили их надежность и ожидаемую точность. Прототипы подобных гироскопов, в принципе, могут быть созданы и для использования на ПЛ и других морских подвижных объектах.

1.2 Гироскопы на волнах де Бройля

Гироскопы на волнах де Бройля используют тот же эффект, что и лазерные (ЛГ) и волоконно-оптические (ВОГ) гироскопы. Положительная особенность этих гироскопов состоит в том, что они являются электронными приборами и по сравнению с «механическими» гироскопами малочувствительны к воздействию вибраций, ускорений и ударов. Они обладают большой надежностью, меньшим временем выхода на рабочий режим из выключенного состояния, меньшей продолжительностью выставки и меньшим энергопотреблением. Кроме того, выходная информация с них является дискретной, что существенно облегчает сопряжение таких гироскопов с бортовым вычислительным устройством.

Высокая точность гироскопов на волнах де Бройля определяется, в первую очередь, тем, что в них используются излучения со значительно меньшими длинами волн по сравнению с лазерными и волоконно-оптическими гироскопами. Действительно, в основе работы лазерных и волоконно-оптических гироскопов, как известно, лежит соотношение:

$$\Delta\varphi = 8\pi S\theta / c\lambda, \qquad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз между встречными лучами, возникающая при вращении кольцевого контура, по которому лучи циркулируют;

S – площадь контура;

θ – проекция вектора абсолютной угловой скорости на нормаль контура;

c – скорость света;

λ – длина волны.

Из этой формулы следует, что для повышения чувствительности гироскопов, подобных ЛГ и ВОГ, наряду с повышением площади контура S (что весьма ограничено), необходимо использовать излучения с меньшими длинами волн. Поскольку переход от длин волн оптического диапазона к более коротким (рентгеновским и гамма-лучам) затруднен из-за сложности организации их перемещения по замкнутому контуру, повышения чувствительности можно добиться за счет использования волновых свойств частиц вещества. Известно, что любой частице, обладающей импульсом P, соответствует волна, длина которой определяется формулой де Бройля:

$$\lambda = h/P = h/mv, \qquad (2)$$

где h – постоянная Планка, равная $6{,}62\cdot10^{-34}$ Дж·с или $6{,}62\cdot10^{-27}$ эрг·с;

$P=mv$ – импульс частицы, обладающей массой m и скоростью v.

Волновыми свойствами обладают частицы любой массы. Для частицы массой 1 г, движущейся со скоростью 1 см/с, в частности, длина волны де Бройля равна $6{,}62\ 10^{-27}$ см. Такая длина волны лежит далеко за пределами возможности ее обнаружения. Интерес могут представлять лишь частицы с массой, сравнимой с массой электрона или протона. У таких частиц длина волны де Бройля имеет порядок нескольких ангстрем, что доступно для обнаружения их волновых свойств. При создании гироскопов на волнах де Бройля обычно используют интерферометры Маха – Цендера, в которых встречные волны проходят половину замкнутого контура.

Первые интерферометры на частицах для измерения вращения Земли начали разрабатываться еще в 1970-х годах. В качестве частиц в них использовались нейтроны [4–6]. Позднее (с 1990-х годов) для этой цели использовались электроны, атомы [7, 8] и молекулы [9, 10]. По некоторым оценкам, чувствительность гироскопов на волнах де Бройля может превосходить чувствительность лазерных гироскопов на 9–10 порядков, что позволяет существенно (на четыре порядка с учетом шумов) превзойти уровень точности, доступной для лазерных и волоконно-оптических гироскопов [11]. По данным, приведенным в работе [12], уже в 2006 г. ·была достигнута нестабильность нуля (1σ) менее $7\cdot10^{-7}$ град./ч, стабильность масштабного коэффициента лучше 5 ppm, случайный дрейф нуля – около $3\cdot10^{-6}$ град./ч.

1.3 Гироскопы на основе конденсата Бозе – Эйнштейна

Известно, что частицы, обладающие целым (0,1,2,…) спином (в единицах h=$1{,}05\cdot10^{-27}$ эрг·сек), подчиняются квантовой статистике Бозе – Эйнштейна. А частицы с полуцелым спином – квантовой статистике Ферми – Дирака. Характерной особенностью первых является то, что в каждом квантовом состоянии может находиться произвольное число частиц. Тогда как в случае частиц с полуцелым спином в каждом квантовом состоянии может находиться не более одной частицы. Эти различия весьма существенным образом влияют на поведение частиц при низких температурах. Для частиц, подчиняющихся статистике Бозе – Эйнштейна, при температурах ниже некоторой критической (так называемой температуре вырождения) конечная доля всех частиц скапливается в состояние с нулевым импульсом. Это состояние получило название конденсации Бозе – Эйнштейна.

Частицами, подчиняющимися квантовой статистике Бозе – Эйнштейна, являются: фотоны с массой покоя, равной 0, и спином 1, π-мезоны со спином 0 и массой, отличной от нуля, а также атомные ядра с четным числом нуклонов.

К частицам, подчиняющимися квантовой статистике Ферми – Дирака относятся: электроны и ядра с нечетным числом нуклонов. Отмеченные особенности частиц, подчиняющихся квантовой статистике Бозе – Эйнштейна, могут быть положены в основу создания гироскопов кольцевого типа, использующих сверхтекучие фазы газа, которые представляют собой Бозе – Эйнштейна конденсат (БЭК). Впервые такой конденсат экспериментально наблюдали в 1995 г. [13], а интерференцию двух БЭК на основе атомов натрия – в 1997 г. [14]. В настоящее время интерферометры на БЭК усиленно исследуются, в том числе, и в интересах их использования для измерения вращения. В работе [15], в частности, описаны результаты эксперимента по созданию БЭК-гироскопа. С этой целью БЭК сигарообразной формы, удерживаемый первоначально в ловушке, расщеплялся когерентно в поперечном направлении на две части, каждая из которых

перемещалась по контуру в продольном направлении навстречу друг другу, затем они накладывались, образуя интерференционную картину, которая регистрировалась по плотности атомов.

1.4 Гироскопы на основе сверхтекучести

При низких температурах изотопы гелия (гелий-3 и гелий-4) становятся сверхтекучими. Гелий-3 – при температуре ниже 0,0025 К, а гелий-4 – при температуре ниже 2,17 К. Явление сверхтекучести гелия было открыто П. Л. Капицей еще в 1938 г. Теорию сверхтекучести гелия разработал Л. Д. Ландау в 1941 г. В настоящее время в США (с 1969 г.) и во Франции (с 1985 г.) ведутся работы по созданию на основе сверхтекучести гелия гироскопов кольцевого типа, подобных лазерным и волоконно-оптическим [16–19]. В 1990-х годах с помощью такого гироскопа удалось измерить вращение Земли.

2. **Физические явления, пригодные для создания новых средств коррекции погрешностей навигационных систем**

Используемые в настоящее время на морских объектах инерциальные навигационные системы требуют периодической коррекции из-за дрейфа гироскопов, погрешностей акселерометров и других причин. Известно три способа коррекции ИНС: по углу (в частности по звездам), по скорости (по информации от лагов) и по положению (по маякам-ответчикам, радионавигационным системам и т. п.). Однако коррекция от относительных лагов не обеспечивает требуемые точности. Использование же абсолютных лагов, как и других перечисленных выше средств, может привести к демаскированию объекта. Это диктует необходимость поиска средств коррекции на основе новых для навигации полей и излучений. Обратимся к их рассмотрению.

2.1 Сейсмические волны

Сейсмические волны – это низкочастотные ударные волны, распространяющиеся как по поверхности, так и в глубинах недр Земли. Поверхностные быстро затухают, их скорость не превышает нескольких км/с, глубинные же со скоростью до 13 км/с пронизывают на своем пути все земное пространство на тысячи км. Это дает основание надеяться на возможность использования таких волн в интересах средств коррекции ИНС. Существенно подчеркнуть, что времена пробега сейсмических волн в Земле флуктуируют незначительно (доли процента), а амплитудные значения в зависимости от характера трассы распространения – в несколько раз. Следовательно, для каждого интервала расстояний имеется свой оптимальный диапазон частот. Для расстояний 1–10 км этот диапазон составляет 40–150 Гц, для расстояний 10–200 км – диапазон 7–30 Гц, для расстояний 200–1000 км – диапазон 3–5 Гц и для расстояний 1000–10000 км – диапазон 1–3 Гц. Таким образом, имеется определенная аналогия с радиоволнами. Однако вследствие меньшей скорости распространения сейсмических волн при их сравнительном анализе необходимо ориентироваться не на диапазон частот, а на диапазон длин волн. Сейсмическая волна с частотой 1 Гц эквивалентна электромагнитной волне с частотой 30–60 кГц, длины волн 5–10 км.

Аналогия сейсмических и радиоволн позволяет надеяться на возможность использования в интересах коррекции ИНС одних и тех же принципов. В частности, сейсмические системы могут работать как в дальномерном, так и в разностно-

дальномерном режимах. К положительным особенностям сейсмических средств коррекции можно отнести:

– большую дальность действия (десятки тысяч км);
– возможность приема сигналов на любой глубине плавания;
– многолучевость в месте приема, что обеспечивает специфическую «окраску» принимаемого сигнала и облегчает тем самым его выделение на фоне помех;
– высокую стабильность среды;
– высокую боевую устойчивость системы;
– относительно низкие скорости распространения сейсмических волн, что позволяет снизить примерно на четыре порядка требования к точности синхронизации и точности измерения временных интервалов.

К недостаткам рассматриваемых волн при использовании в интересах средств коррекции ИНС можно отнести:

– значительный пространственный разброс скорости их распространения, что требует предварительного изучения трасс, подготовки полигона и возможности использования систем только в полигоне (однако в силу стабильности земных недр такой полигон может использоваться неограниченное число лет);
– большое энергопотребление сейсмоисточников (от единиц до сотен кВт).

2.2. Электромагнитные сигналы естественных сейсмоисточников

В последние годы рядом исследователей естественных электромагнитных сигналов (ЭМС) были обнаружены сигналы, источником которых являются зоны тектонического нарушения земной коры. Они возникают в областях так называемых тектонических разломов, особенно там, где разломы одного простирания пересекаются разломами другого, в результате чего образуются блочные геотектонические структуры. При подвижке этих блоков и тектонических плит возникают зоны колоссального давления, причем их напряжения могут оказаться столь значительными, что это приводит к сейсмической разрядке в виде землетрясений.

Особенно часто тектонические нарушения и связанные с ними ЭМС наблюдаются в шельфовых зонах, в океанах вблизи островных дуг, в районах палеорек, в зонах активной вулканической деятельности. В некоторых случаях эти ЭМС могут являться предвестниками землетрясений, с чем, собственно, и связано большое внимание к ним исследователей.

Сигналы инфранизкого диапазона частот, скорее всего, являются «коренными» сигналами. Они наблюдаются в виде характерных цугов коротких импульсов длительностью 1–3 с и амплитудой по магнитной составляющей 10–20 нТл, что сравнимо с величиной средних солнечно-суточных вариаций. Интервал между импульсами в цуге 20–200 с.

Когда сейсмоисточник (СИ) находится в спокойном режиме, за час можно наблюдать до 3–4 цугов, когда же источник активизируется, то после некоторой паузы (от нескольких часов до 20–40 ч), частота появления сигналов растет вплоть до сейсмотолчка, после чего все повторяется. Как показано в работе [20], уверенная зона приема импульсных электромагнитных сигналов (ЭМС) естественного происхождения достигает 50 км, когда режим СИ спокойный, что соответствует обычному длительному их состоянию. При активизации СИ излучаемая мощность растет, и зона действия значительно расширяется, увеличиваясь в 10 и более раз.

Особенно благоприятны условия использования ЭМС СИ на подводных объектах. Объясняется это тем, что ЭМС атмосферного происхождения находятся в верхней полусфере, а ЭМС СИ – в нижней. Это приводит к тому, что естественные ЭМС атмосферы, являющиеся помехами при регистрации сигналов СИ, при подводном приеме в значительной степени затухают.

2.3. Солитоны

Солитоны представляют собой новый объект науки. Они обладают свойствами волн и частиц одновременно, но не являются в полном смысле ни тем, ни другим. Теория солитонов и их приложений в физике является бурно развивающейся областью науки, а потому многое в ней еще проясняется и уточняется. Это касается даже самого понятия «солитон». В энциклопедии «математической физики», вышедшей в 1998 г., солитон определяется как «уединенная волна, которая при взаимодействии с другими локальными возмущениями всегда восстанавливает свою первоначальную форму, т. е. взаимодействует упругим образом (подобно частицам)».

В отличие от обычных волн, представляющих собой периодические повторения в пространстве возвышений и впадин на поверхности воды, или уплотнений и разряжений плотности, солитоны имеют вид «однополярных» или куполообразных возвышений (уплотнений и т. п.), распространяющихся как единое целое с некоторой скоростью. Они способны взаимодействовать друг с другом подобно заряженным частицам, притягиваться и отталкиваться, разряжаться и гибнуть, образовывать устойчивые ансамбли с нетривиальной динамикой пульсирующего и иного характера, преодолевать тенденцию к беспорядку и пр.

Простейший вариант солитона можно наблюдать на поверхности воды, когда корабль вдруг останавливается, но масса воды, которую он привел в движение, не останавливается, а, приняв форму большого, четко выраженного холма, продолжает свой путь, не меняя формы и не снижая скорости. Если для обычных волн скорость распространения зависит от частоты волны, и поэтому пакет, составленный из набора волн разных частот, расплывается, солитон устойчив во времени.

К настоящему времени в математической физике известно множество различных видов солитонов, и исследование их только начинается. В качестве примера использования солитонов можно сослаться на статью М. В. Смелова [21], в которой подробно описывается приемопередатчик электромагнитных солитонов. Он генерирует и принимает сверхвысокочастотные (СВЧ) электромагнитные солитоны. Передатчик включает в себя задающий СВЧ-генератор несущей частоты, импульсный модулятор и информационный фазовый модулятор. Приемник содержит опорный импульсный СВЧ-генератор, систему автоматической подстройки частоты и квадратурный фазовый детектор. Возможные направления использования в навигации этого нового явления еще только намечаются.

2.4. Сложные (*шумоподобные*) *гидроакустические сигналы*

К сложным относятся сигналы с частотной модуляцией, частотной и фазовой манипуляциями, а также различные кодовые последовательности. Сложные электромагнитные сигналы в настоящее время получили широкое развитие в радиолокации, радионавигации и связи. Они обеспечивают повышенную помехоустойчивость и скрытность работы этих средств. Сравнительный анализ радио- и гидроакустических сигналов указывает на перспективность использования сложных сигналов и в гидроакустике, в частности, для повышения скрытности работы гидроакустических лагов, эхолотов и маяков-ответчиков.

2.5. Коррекция по магнитному полю Земли и искусственным магнитным реперам

Из трех основных физических полей Земли (магнитного, гравитационного и поля рельефа) магнитное обладает наибольшей навигационной информативностью. По этому полю, в принципе, можно уточнить координаты объекта с точностью до единиц – десятков метров, тогда как по рельефу дна – до десятков – сотен метров, а по гравитационному – до единиц километров. Существенным недостатком коррекции по полю рельефа является необходимость использования эхолота, работа которого может демаскировать объект. Возможности коррекции по гравитационному полю с помощью используемых в настоящее время относительных гравиметров ограничены методическими погрешностями. Наиболее существенные из них связаны с эффектом Этвеша, в основе которого лежит воздействие на чувствительный элемент гравиметра центробежной силы и силы Кориолиса. Первая обязана вращению Земли, а вторая – движению объекта по вращающейся Земле. Помимо этого, у используемых при этом морских относительных гравиметров наблюдается уход нуль-пункта, что вынуждает каждые 15–20 суток возвращать объект в опорную базу для снятия накопившихся погрешностей. Современное состояние развития магнитометрии и вычислительной техники позволяет по-новому рассматривать перспективы создания средств коррекции по магнитному полю.

Известны две группы методов определения координат места подвижного морского объекта по магнитному полю Земли (МПЗ). В основе первой группы лежит использование распределения нормальной составляющей МПЗ. Эти методы не требуют предварительной магнитной съемки Земли. Однако достижимая точность определения места по этой составляющей МПЗ невелика, погрешность может достигать 10 км и более. Методы второй группы, использующие аномальные составляющие МПЗ, являются более информативными. Аномалии выступают в этом поле в виде своеобразных гор, долин, хребтов и других особенностей магнитного рельефа.

Помимо МПЗ, для решения рассматриваемой проблемы могут быть использованы и специально уложенные на морском дне намагниченные тела, в том числе затонувшие объекты, координаты которых заранее определены.

Реализация данного метода коррекции зависит от используемых магнитометров. Известные морские магнитометры, предназначенные для измерения МПЗ, для исключения влияния магнитного поля самого объекта на измеряемое поле приходится буксировать за объектом на расстоянии 100–200 метров, что крайне ограничивает возможности таких систем.

Анализ состояния разработок морской магнитометрической аппаратуры показывает, что перспективы ее развития связаны с возможностью размещения их чувствительных элементов непосредственно на борту объекта. Эти перспективы реализованы в результате выполнения ряда НИР («Магнит», «Щит-АЕН», «Щецин-АЕН», «Маглаг»). Разработаны, созданы и испытаны в стендовых и морских условиях (на гидрографических судах) макетные образцы магнитометрических систем, способных работать непосредственно на борту морского объекта [22].

Магнитометрический метод определения координат места подвижного морского объекта является в некоторой степени альтернативой спутниковой навигационной системы и обладает следующими положительными особенностями:

– недемаскирующим характером работы;

– относительно небольшими массогабаритными характеристиками;

– малой потребляемой энергией;

– большой устойчивостью к нарушениям работы в угрожаемый период и в условиях боевых действий;

– долговечностью использования «магнитных полигонов» и возможностью их наращивания.

2.6. Коррекция с помощью абсолютного гравиметра

Кроме новых, для навигации видов полей и излучений (так сказать, внешних источников) для коррекции погрешностей морских средств навигации можно использовать и внутренние, автономные. Одним из таких новых автономных средств коррекции, по нашему мнению, может быть абсолютный гравиметр. В настоящее время на ПЛ используются относительные гравиметры, но они обладают рядом трудно устранимых погрешностей. Достигнутая точность лучших морских относительных гравиметров составляет 0,5–1 мГал. Точность абсолютных гравиметров в стационарных условиях составляет единицы мкГал. Абсолютных гравиметров, работающих на подвижных морских объектах, в настоящее время нет, однако перспективы их создания просматриваются. В частности, один из вариантов такого гравиметра предложен нами [23]. С созданием высокоточных абсолютных гравиметров, способных работать на морских подвижных объектах, задача коррекции погрешностей ИНС, как показывают результаты наших исследований [24, 25], может быть решена.

2.7. Коррекция погрешностей ИНС с помощью гравитационных градиентометров

На точность ИНС подвижного морского объекта значительное влияние оказывает уклонение отвесной линии (УОЛ), связанной с Землей. Погрешность определения УОЛ в 1 угл. с вызывает методическую погрешность в определении места объекта, равную 30 м. Величина же УОЛ в океане может достигать 60–90 угл. с. Решение проблемы с УОЛ можно решить с помощью гравитационных градиентометров. Начало их развития в интересах навигации относится к 1970-м годам. К настоящему времени выполнено значительное число разработок таких градиентометров, однако достичь требуемого уровня до сих пор не удалось. Состояние этих разработок рассмотрено в обзорной статье [26]. Учитывая важность работ по созданию гравитационных градиентометров, нами предложены два их новых варианта [27, 28].

2.8. Новые методы коррекции по навигационным спутникам

В настоящее время известен ряд методов спутниковой коррекции параметров ориентации, в частности, курса объекта (дальномерный, доплеровский, угломерный, фазовый). Однако их реализация в реальных условиях встречает ряд серьезных, до конца не преодоленных трудностей.

Нами предложены новые методы спутниковой коррекции. Один из них [29] условно назван «координатным», так как он позволяет определять параметры ориентации объекта по данным спутниковой навигационной системы о координатах спутников в топоцентрической и связанной системах координат. В основу другого [30] положен подход Гаусса по определению орбиты спутника по данным угловых измерений в три момента времени. Эти методы позволяют определять местоположение, скорость и курс подвижного объекта.

3. Новый способ измерения абсолютной скорости

Основным измерителем абсолютной скорости морских объектов является гидроакустический лаг. Наиболее существенным недостатком его использования, особенно на подводных лодках, является возможность демаскирования объекта при его работе. Рассмотренные выше перспективы создания бортовых магнитометрических систем позволили разработать абсолютный лаг, работающий по магнитному полю Земли [31].

Основными положительными сторонами такого лага являются:

– автономность работы;
– недемаскирующий характер работы;
– относительно малые массогабаритные характеристики;
– малое потребление энергии;
– относительно высокая точность определения скорости объекта, зависящая от аномалий магнитного поля, точности регистрации углового положения объекта и стабильности параметров его намагниченности в моменты измерения скорости.

4. Температурная стабилизация основных составных частей средств навигации

На точность работы средств навигации морских объектов, особенно ИНС, значительное влияние оказывает температурная стабилизация их основных элементов. В существующих ИНС стабилизация температуры осуществляется ее автоматической регулировкой на уровне, превышающем комнатную. Это ведет к необходимости вначале к поднятию температуры, а затем – к поддержанию ее на определенном уровне с помощью соответствующих регуляторов. Возможности такой стабилизации, естественно, ограничены.

Для стабилизации температуры предлагается использовать не повышение ее по сравнению с комнатной, а понижение. Использование низких температур приводит к:

– резкому снижению коэффициента температурного линейного расширения всех материалов;
– уменьшению разницы коэффициентов температурного линейного расширения разных материалов;
– повышению модуля упругости всех материалов;
– повышению добротности механических устройств (за счет снижения уровня внутреннего трения) и др.

В настоящее время имеется значительное число хладагентов с температурами от нуля до -195,8ºС (температура жидкого азота) и ниже. Криостаты позволяют хранить низкую температуру много месяцев. Наиболее удобно для этой цели использовать жидкий азот, который получают из воздуха. Учитывая дешевизну его получения, возможность хранения в том числе в условиях ПЛ, а также инертность, рабочее состояние ИНС и других средств навигации можно стабильно поддерживать длительное время, сокращая тем самым и их ввод в рабочий режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малеев П. И. Гироскопические чувствительные элементы: классификация и уровень развития // Навигация и гидрография. – 2014. № 37. – С. 18–28.
2. Малеев П. И., Рассохо А. И. Перспективы использования сверхпроводимости в навигации и гидрографии // Записки по гидрографии. – 1995. – № 236. – С. 67–74.
3. Пешехонов В. Г. Уникальный гироскоп обеспечил проверку общей теории относительности // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 4(59). – С. 111–114.
4. Кробка Н. И. Квантовая микромеханика: гироскопы на волнах де Бройля и квантовых свойствах сверхтекучих жидкостей. Тенденция и Opticscостояние разработок // Гироскопия и навигация. – 2009. № 3(66). – С. 36–55.
5. Page L. A. Effect of Earths Rotation in Neutron Interferometry // Phys. Rev. Lett. –1975. – Vol. 35. – No 8. – P. 543.
6. Effekt of Earths Rotation on the Quantum Mechanical Phase of the Neutron S. A. Werner [et. al.] // Phys. Rev. Lett. – 1979. – Vol. 42. – No 17. – Pp. 1103–1106.
7. Hasselbach F. Sagnac experiment with electrons: Observation of the rotational phase shift of electron waves in vacuum / F. Hasselbach, M. Niclaus. // Phys. Rev. A. – 1993. – Vol. 48. – No 1. – Pp. 143–151.
8. Neutze R. Sagnac experiment with electrons: Reanalesis of a rotationally induced phase shift for charged particles / R. Neutze, F. Hasselbach. // Phys. Rev. A. – 1993. – Vol. 58. – No 1. – Pp. 557–565.
9. Riehle F, Kisters T, Witte A, Helmcke J, Bordé C. J. Optical Ramsey spectroscopy in a rotating frame: Sagnac effect in a matter-wave interferometer // Physical Review Letters. – 1991. – Vol. 67. No 2. – Pp. 177–180.
10. Chapman M. S., Ekstrom Ch. R., Hammond T. D., Rubenstein R. A., Schmiedmayer J., Wehinger S., Pritchard D. E. Optics and Interferometry with Na 2 Moleccules // Physical Review Letters. – 1995. – Vol. 74. – No. 24. – Pp. 4783–4786.
11. Scully M. O. Quantum-noise limits to matter- wave interferometry/ M. O. Scully, J. P. Dowling. // Physical Review Letters. – 1993. – Vol. 48. – No 4. – Pp. 3186–3190.
12. Durfee D. S., Shaham Y. K., Kasevich M. A. Long-Term Stability of an Area-Reversible Atom-Interferometer Sagnac Gyroscope // Physical Review Letters. 97, 240801 – Published 15 December 2006. – 4 p.
13. Davis K. B., Mewes M.-O., Andrews M. R., van Druten N. J., Durfee D. S., Kurn D. M., Ketterle W. Bose-Einstein Condensation in a Gas of Sodium Atoms // Physical Review Letters. – 1995. – Vol. 75. – No. 22. – Pp. 3969-3973.
14. Andrews M. R., Townsend C. G., Miesner H.-J., Durfee D. S., Kurn D. M., Ketterle W. Observation of Interference Between Two Bose Condensates // Science. – 1997. – Vol. 275. – Issue 5300. – Pp. 637–641.
15. Tolstikhin O. I., Morishita T., Watanabe Sh. Gyroscopic effects in interference of matter waves // Physical Review A 2005. – Vol. 72. – No. 5. – DOI: 10.1103/PhysRevA.72.051603
16. Sato Y, Joshi A., Packard R. Superfluid 4He quantum interference grating // Physical Review Letters. – 2008. – Vol. 101. – No 8. DOI:10.1103/PhysRevLett.101.085302
17. Вароко Е. , Вароко Г. Эффект Саньяка в сверхтекучих жидкостях // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178. – С. 217–221. DOI: 10.3367/UFNr.0178.200802k.0217
18. Avenel O, Varoquaux E. Observation of singly quantized dissipation events obeying the Josephson frequency relation in the critical flow of superfluid 4He through an aperture // Physical Review Letters. – 1985. – Vol. 55. – № 24. – Pp. 2704–2707. DOI: 10.1103/PhysRevLett.55.2704
19. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмоэлектромагнитные явления. – М.: Наука, 1998. – 176 с.
20. Наумов А. П., Малеев П. И. Электромагнитные сигналы сейсмоисточников как естественные навигационные ориентиры // Навигация и гидрография. – 1999. № 8. – С. 79–82.
21. Смелов М. В. Приемопередатчик электромагнитных солитонов // Физическая мысль России. М.: МГУ. – 1998. № 2. – С. 31–42.
22. Малеев П.И. Возможности создания системы коррекции корабельных навигационных комплексов по магнитному полю // Навигация и гидрография. – 2016. – № 44. – С. 9–15.
23. Малеев П. И., Попов А. Б. К вопросу создания абсолютного гравиметра для морских подвижных объектов // Навигация и гидрография. – 2018. – № 51. – С. 40–49.
24. Малеев П. И., Попов А. Б. К вопросу повышения точности и скрытности работы навигационного комплекса подводных лодок // Навигация и гидрография. – 2018. – № 51. – С. 22–30.

25. МалеевП. И., Попов А. Б. К вопросу повышения точности выработки курса и широты инерциальной навигационной системой подводной лодки // Навигация и гидрография. – 2019. – № 55. – С. 7–13.
26. Евстифеев М. И. Состояние разработок бортовых гравитационных градиентометров // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24. – № 3(94). – С. 96–114.
27. Малеев П. И., Попов А. Б. К вопросу повышения точности и помехозащищенности гравитационного градиентометра для подвижных морских объектов // Навигация и гидрография. – 2018. – № 52. – С. 32–40.
28. Малеев П. И., Андреянов Д. И. Способ повышения точности акселерометрических гравитационных градиентометров // Навигация и гидрография. – 2019. – № 55. – С. 28–32.
29. Резниченко В. И., Малеев П. И., Смирнов М. Ю. Спутниковая коррекция параметров ориентации морских объектов // Навигация и гидрография. – 2008. – № 27. – С. 25–32.
30. Патент № 2448326 (Россия). Способ спутниковой коррекции автономных средств навигации подвижных объектов // Гаврилов В.В., Курсин С. Б., Лапшина В. И, Малеев П. И. Приоритет от 10.06.2010 г.
31. Малеев П. И., Капустин И. В., Конеченков Е. А., Гидаспов Д. Д., Шеремет В. И. Бортовая магнитометрическая система определения абсолютной скорости. Результаты разработки и испытаний // Записки по гидрографии. – 2005. – Вып. 263. – С. 13–18.

NEW POSSIBLE DIRECTIONS OF CREATION OF MEANS OF HIGH-PRECISION NAVIGATION OF MARINE OBJECTS

P. I. Maleev («GNINGI» JSC)

On the basis of the analysis of achievements of the last years in physics and a number of other areas of science the effects, phenomena and fields suitable for creation of new high-precision means of navigation of marine objects are revealed. The principles of the device and operation of such means are considered. Their expected accuracy and other parameters are estimated. The analysis of the state of their development.

УДК 629.7

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ АВТОНОМНОЙ БОРТОВОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПРИЁМА И ОБРАБОТКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ В ИНТЕРЕСАХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЛОНАСС

В. Н. ЦЫКУНОВ
(ВКА имени А. Ф. Можайского)

В статье предлагается алгоритм формирования автономной ботовой шкалы времени космического аппарата на основе приёма и обработки излучений нейтронных звёзд (пульсаров) для поддержания качественных показателей частотно-временного обеспечения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС.

Важными элементами инфраструктуры государства являются технические средства и системы, решающие задачи координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) всех видов потребителей. Наличие у России систем и средств КВНО позволяет более эффективно решать задачи сохранения экономического и политического суверенитета, территориальной целостности государства.

Одним из основных направлений совершенствования средств КВНО является использование и развитие глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС.

Функционирование ГНСС без заметного ухудшения точности определяется периодом закладки на борт навигационных космических аппаратов (НКА) временных программ, эфемерид и информации об отклонении бортовой шкалы времени (ШВ) от системной ШВ и составляет величину порядка 12 часов [1]. Это обстоятельство является существенным недостатком системы.

Для обеспечения высокой точности определения координат потребителя – в пределах нескольких метров – погрешность бортовых часов навигационных космических аппаратов ГНСС ГЛОНАСС не должна превышать нескольких наносекунд в пределах интервала в несколько часов.

Для формирования системных шкал времени в наземном комплексе управления (НКУ) используют групповые атомные стандарты с целью обеспечения высокой точности. В силу специфических ограничений стабильность шкалы времени бортовых стандартов НКА значительно уступает шкалам времени НКУ. Поэтому бортовые часы требуют ежесуточных сравнений с более стабильными наземными стандартами, что является основной причиной, ограничивающей интервал автономного функционирования орбитальной группировки ГНСС [2].

Учитывая, что именно бортовые стандарты частоты определяют период автономной работы ГНСС, можно выделить следующие направления его увеличения [3]:

а) уменьшение нестабильности бортовых стандартов частоты;

б) разработка методов и создание аппаратуры взаимной привязки ШВ НКА и реализация идеи синхросетевого метода формирования системной ШВ;

в) повышение точности прогнозирования хода бортовой шкалы времени,

г) поиск и применение альтернативных методов повышения автономности.

В статье предлагается альтернативный метод повышения автономности ОГ ГНСС путём формирования бортовой шкалы времени на борту КА с использованием технологии приёма и обработки излучения пульсаров и сравнения с ней локальных шкал времени НКА.

В настоящее время известна возможность использования излучения нейтронных звёзд (пульсаров) в радио, рентгеновском и видимом диапазоне волн для автономной навигации в космосе и обеспечения потребителей координатно-временной информацией. Излучение пульсаров предлагается использовать для создания на борту КА высокоточной барицентрической шкалы времени.

Пульсары представляют собой быстровращающиеся нейтронные звезды, которые обладают устойчивым излучением во всем спектре электромагнитной энергии. Период вращения, будучи наблюдаемым параметром, представляет собой измеряемую величину, которая непосредственно определяет моменты прихода импульсов (МПИ) излучения и их временные соотношения в наблюдаемой последовательности импульсов. Стабильность среднего импульса пульсара пропорциональна $10^{-3} - 10^{-4}$ от его периода (P). Для оценивания параметров принимаемого излучения проводится усреднение нескольких сотен стабильно следующих индивидуальных импульсов и формируется средний импульс, профиль которого остается неизменным в течение многих лет. По профилю среднего импульса оценивается момент прихода импульсов.

Наблюдаемые пульсары по угловой скорости подразделяются на две группы:

1) быстро вращающиеся пульсары с периодом вращения всего несколько миллисекунд с производной в диапазоне $\dot{P} = 10^{-19}...10^{-21}\,\text{с}\cdot\text{с}^{-1}$;

2) более медленные, секундные пульсары с производной $\dot{P} = 10^{-15}...10^{-16}\,\text{с}\cdot\text{с}^{-1}$ [4].

Момент прихода наблюдаемых радиоимпульсов зависит от параметров вращения – периода P или частоты υ и их производных. Эти величины взаимосвязаны. Связь времени, частоты и периода выражается либо в виде зависимости номера импульса N от частоты импульсов и ее производных, либо в виде зависимости времени прихода PT импульса N от периода и его производных. [5]

Выражение имеет вид:

$$PT(N) = t_0 + P_0 N + \frac{1}{2} P_0 \dot{P} N^2 + \frac{1}{6}\left(P^2 \ddot{P} - 2P_0 \dot{P}^2\right) N^3 . \qquad (1)$$

На рис. 1 показан вклад каждого компонента ряда в промежутке приблизительно двухлетних наблюдений пульсара J1643-1224, который имеет следующие параметры вращения P=0.00462164 с; $\dot{P} = 1{,}84628 \cdot 10^{-20}\,\text{с}\cdot\text{с}^{-1}$; $\ddot{P} = 2{,}1685 \cdot 10^{-37}\,\text{с}^{-1}$.

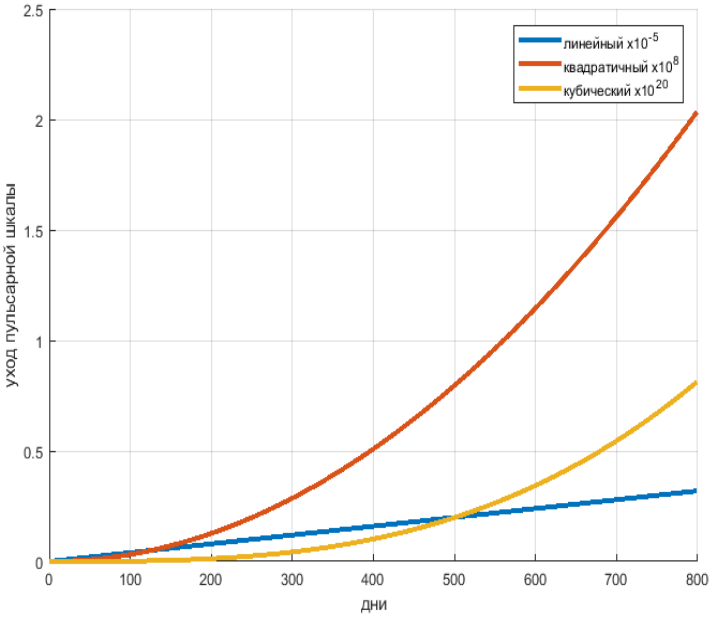


Рис. 1. Вклад каждого компонента ряда в промежутке приблизительно двухлетних наблюдений пульсара J1643-1224

Ожидаемый вклад третьей производной настолько мал, что определяемый ею компонент в двухлетнем промежутке не превышает наносекунды или меньше, так

что его нельзя обнаружить даже современными физическими средствами измерения на фоне наблюдаемых инструментальных шумов, и он не учитывается.

Очевидно, что при выборе начального события для другой эпохи значение периода будет другим, измененным с учетом производных в промежутке между этими двумя эпохами. Однако и новые значения параметров будут точно соответствовать степенному ряду (1) при любом расширении окрестности начального события в пределах, задаваемых переменной $t = P_0 N$.

Если начальную эпоху выбирать произвольно, то новое фиксированное значение периода на эту эпоху будет определяться его производными и переменной *t*:

$$P_0^* = P_0 + \dot{P}t\,; \qquad \dot{P} = \dot{P}_0 + \ddot{P}t\,.$$

После подстановки

$$P_0^* = P_0 + \dot{P}_0 t + \ddot{P}t^2\,; \qquad t = P_0^* N$$

выражение (1) принимает вид:

$$PT = P_0^* N + \frac{1}{2} P_0^* \dot{P} N^2 + \frac{1}{6}\left(P_0^{*2}\ddot{P} - 2P_0^* P^2\right)N^3\,, \qquad (2)$$

где левая часть представляет собой интервал наблюдаемого события излучения, отсчитываемый от начального события, а правая часть – аналитическое выражение этих интервалов через фиксированные на начальную эпоху параметры вращения пульсара.

Независимо от эпохи, выбранной для продолжения наблюдений, численные значения параметров вращения, по которым определяются интервалы на эпохе текущих наблюдений в любой координатной системе, согласованы с параметрами вращения, установленными в прошлом [6].

При этом возможная достигаемая точность синхронизации шкал при приеме сигналов миллисекундных пульсаров составляет десятки и единицы наносекунд, а долговременная стабильность шкалы времени может доходить до 10^{-17}, что сопоставимо с атомными часами [2].

На рис. 2 показана дисперсия Аллана для различных стандартов частоты [7].

Моменты наблюдаемых импульсов пульсара, обладая высокой степенью периодичности на большой протяженности, неизбежно содержат компоненты случайных вариаций, которые обусловлены не столько собственными характеристиками пульсара, сколько факторами внешних воздействий, таких как движение небесных тел, неоднородность среды, гравитационные поля, погрешности инструментальных средств наблюдения, значения которых априори известны лишь приблизительно.

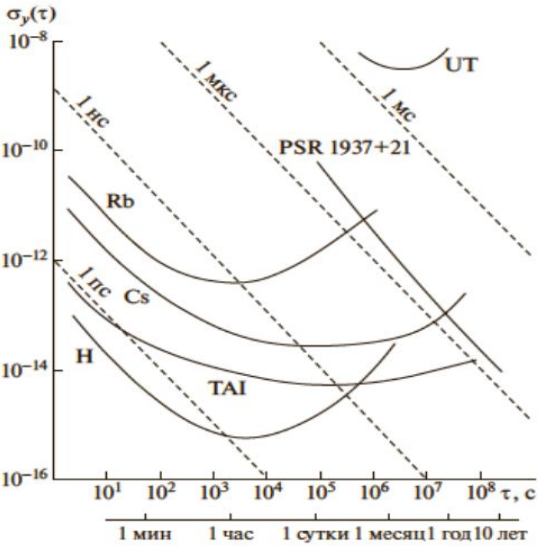


Рис. 2. Дисперсия Аллана различных стандартов частоты

Ошибки, связанные с прохождением сигнала через атмосферу, ионосферу Земли можно исключить, если осуществить приём излучения пульсаров в околоземном космическом пространстве. При этом приём излучения пульсаров оптимально организовать на геостационарной орбите (ГСО), так как с этой орбиты пульсары будут наблюдаться постоянно. Период вращения КА на ГСО равен периоду вращения Земли, что даёт возможность постоянного наблюдения за КА средствами наземного комплекса управления.

Для формирования шкалы времени выберем группу пульсаров, имеющих наибольшее значение спектральной плотности потока излучения, наиболее близкое взаимное положение в пространстве для одновременного приёма с чётко выраженным профилем и наименьшим значением периода следования импульсов $P_0 < 1\,\text{мс}$. Выбранные пульсары и их характеристиками представлены в таблице.

Характеристики выбранных пульсаров

PSR	J1713+0747	J1824-2452A	J1730-2304	J1643-1224	J2145-0750
*S*400, мЯн	36	40	43	75	100
*S*1400,мЯн	4,9	4,2	2,7	3,9	4,0
P,c	0,00457013	0,003054316	0,008122798	0,00462164	0,01605242
W, с	0,00135	0,000915	0,00243	0,001386	0,004815
σ, мкс	0,4	1,6	1,6	1,7	1,8
σ^*, мкс	0,0023	0,0045	0,0059	0,0048	0,005
σ/*T*	$7{,}8\cdot10^{-16}$	$3{,}3\cdot10^{-15}$	$3{,}2\cdot10^{-15}$	$3{,}3\cdot10^{-15}$	$3{,}4\cdot10^{-15}$

Примечания. *S*400, *S*1400 – плотность потока мощности излучения на частоте 400 МГц и 1400 МГц соответственно, выраженная в Янских ($1\,\text{мЯн} = 10^{-29}\,\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{Гц}}$), значения указаны при приёме излучения на поверхности Земли;

P – период вращения пульсара;

W – длительность импульса излучения пульсара;

σ – среднеквадратичное отклонение (СКО) времени МПИ;

σ^* – СКО времени МПИ на интервале наблюдений, более 3 лет;

σ/T – относительная нестабильность вращения пульсара.

На рис. 4 представлены усреднённые за несколько лет наблюдений профили импульсов (модели импульсов) выбранных пульсаров.

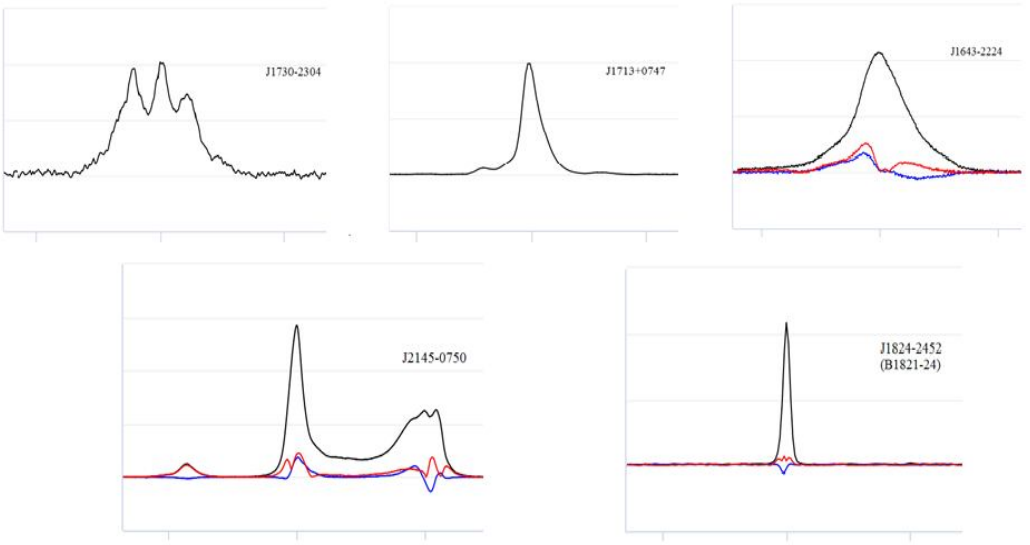


Рис. 4. Усреднённые за несколько лет формы импульсов (модели импульсов) пульсаров

Алгоритм формирования автономной бортовой шкалы времени космического аппарата с использованием технологии приёма и обработки излучения пульсаров представлен на рис. 5.

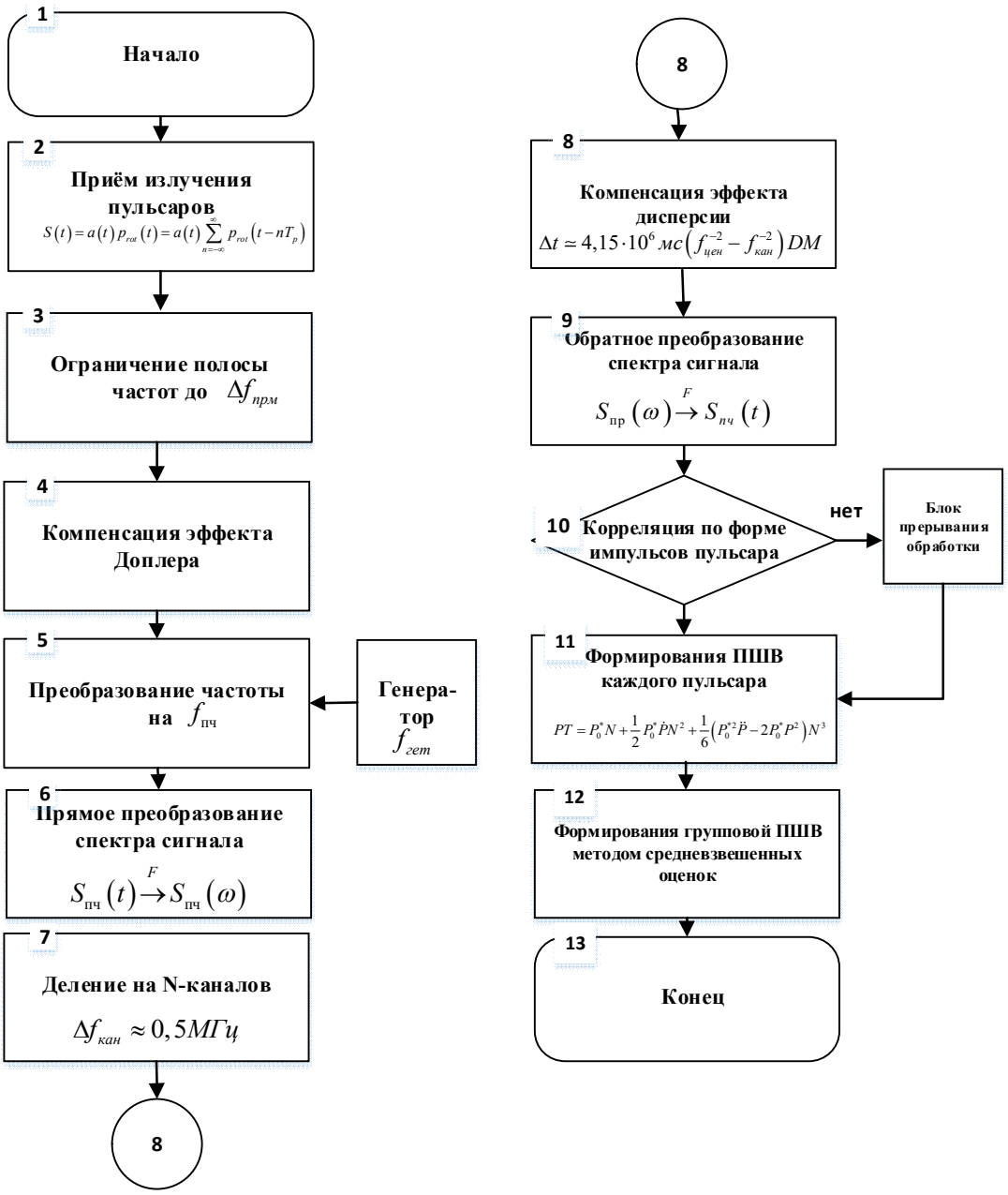


Рис. 5. Алгоритм формирования автономной бортовой шкалы времени космического аппарата с использованием технологии приёма и обработки излучения пульсаров

1) Начало алгоритма.

2) Приём сигнала $S(t)$, включающий сигнал выбранных пульсаров $S_1(t)...S_5(t)$.

3) Ограничение полосы частот 800…1200 МГц до полосы пропускания приёмника $\Delta f = 400$ МГц, при помощи полосового фильтра.

4) Компенсация эффекта Доплера, возникающего при движении КА относительно Земли и относительно пульсаров.

$$F_{\text{Д}} / f_{\text{Н}} = \left(\frac{v_{\tau\text{КА}}}{c} \sin\beta_{\text{З}} + \frac{v_{\tau\text{З}}}{c} \sin\beta_{\text{С}} \right) \cos\alpha - 0{,}5 \left(\frac{v_{\tau\text{КА}}}{c} \cos\beta_{\text{З}} + \frac{v_{\tau\text{З}}}{c} \cos\beta_{\text{С}} \right)^2,$$

где $F_{\text{Д}} / f_{\text{Н}}$ – отношение доплеровского сдвига к несущей частоте;

c – скорость света;

$\beta_{\text{З}}$ – угол относительно Земли;

$\beta_{\text{С}}$ – угол относительно Солнца;

α – угол направления на пульсар;

$v_{\tau\text{КА}}$ – тангенциальная скорость КА;

$v_{\tau\text{З}}$ – тангенциальная скорость Земли.

5) Преобразование частоты принимаемого сигнала до $f_{\text{пч}}$. Результатом является сигнал разностной частоты $f_{\text{прм}}$ и $f_{\text{гет}}$. $f_{\text{пч}} = f_{\text{прм}} - f_{\text{гет}}$. Обычно, $f_{\text{гет}} < f_{\text{прм}}$.

6) Прямое преобразование спектра сигнала $S_{\text{пч}}(t) \xrightarrow{F} S_{\text{пч}}(\omega)$.

7) Разделение принятого сигнала на N частотных каналов по 0,5 МГц.

8) Компенсации межзвёздной дисперсии с помощью введения временной задержки в каналы:

$$\Delta t \cong 4{,}15 \cdot 10^6 \text{ мс} \left(f_{\text{цен}}^{-2} - f_{\text{кан}}^{-2} \right) DM,$$

где DM – мера дисперсии [8].

9) Обратное преобразование спектра сигнала $S_{\text{пч}}(\omega) \xrightarrow{F} S_{\text{пч}}(t)$.

10) Сравнение принимаемых импульсов по среднему профилю. В блоке корреляции по каждому пульсару проходит сравнение принимаемых импульсов по среднему профилю.

Если форма импульса искажена и не соответствует модели, то данные на этой частоте не регистрируются. При совпадении формы принимаемого импульса со средним профилем сигнал идёт в дальнейшую обработку. При этом коэффициент корреляции R>0,8.

11) Формирование шкалы времени по излучению каждого пульсара согласно выражению (2).

12) Формирование групповой шкалы времени путём масштабирования соответствующих «пульсарных» шкал времени, вычисления взвешенного среднего и

присвоения каждому пульсару относительного весового коэффициента, по следующему принципу.

Рассмотрим группу, состоящую из M пульсаров (M=5). Сформируем воспроизводимые пульсарами значения секунды $A_i(i=\overline{1,M})$:

$$A_i(t) = A_{\text{н}} + \Delta_i(t) + \varepsilon_i(t),$$

где $A_{\text{н}}$ – формируемые значения секунды соответствующим пульсаром;

$\Delta_i(t)$ – систематическая составляющая погрешности обусловлена медленно протекающими необратимыми физическими или химическими изменениями. Эта составляющая может быть вызвана, например, замедлением вращения пульсара;

$\varepsilon_i(t)$ – случайная составляющая обусловлена краткосрочными необратимыми физическими изменениями во вращении пульсара, например, внешними условиями, связанными с распространением волн в межзвёздной среде и вспышками на Солнце.

Случайные величины имеют математическое ожидание $E[\varepsilon_i(t)] = 0$ и дисперсию $D[\varepsilon_i(t)] = \sigma^2_{\varepsilon_i}(t)$.

Несмещённая оценка в момент t будет равна среднему взвешенному

$$A_\Sigma(t_k) = \sum_{i=1}^{M} P_i(t_k)\left[A_i(t_k) - \Delta_i(t_k)\right].$$

При условии несмещённости

$$\sum_{i=1}^{M} P_i(t_k) = 1$$

дисперсия оценки равна

$$D\left[A_\Sigma(t_k)\right] = \sum_{i=1}^{M} P_i^2(t_k)\sigma^2_{\varepsilon_i}(t_k).$$

Оценка будет наилучшей, если весовые коэффициенты выбираются в соответствии с формулой:

$$P_i(t_k) = \sigma^{-2}_{\varepsilon_i}(t_k)\left[\sum_{j=1}^{M} \sigma^{-2}_{\varepsilon_j}(t_k)\right]^{-1}.$$

13) Конец алгоритма.

Результаты работы алгоритма по формированию автономной бортовой шкалы времени космического аппарата с использованием технологии приёма и обработки излучения пульсаров представлены на рис. 6, 7.

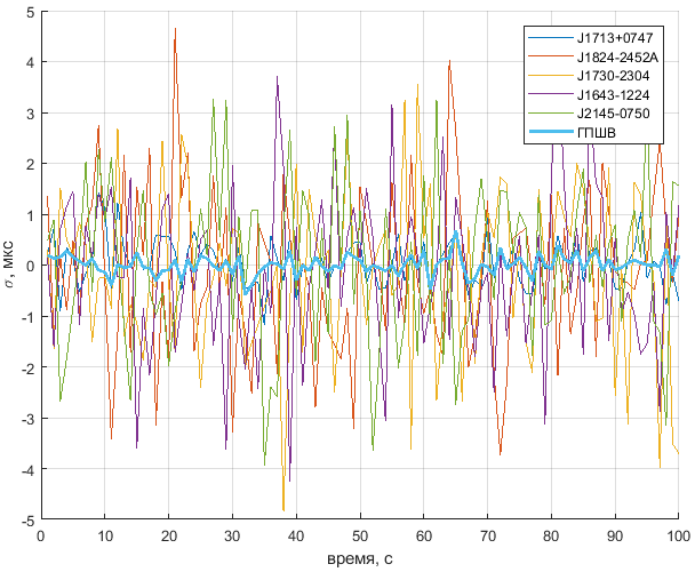


Рис. 6. Ход шкал времени каждого пульсара в отдельности и объединённых в группу на интервале оценки СКО МПИ в 1 год

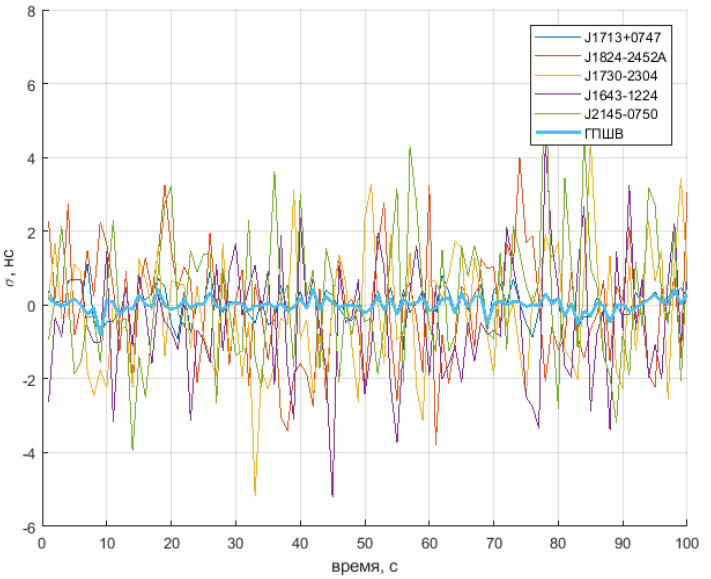


Рис. 7. Ход шкал времени каждого пульсара в отдельности и объединённых в группу на интервале оценки СКО МПИ в три года

Из результатов моделирования следует, что на больших интервалах приёма излучения пульсаров в околоземном космическом пространстве возможно

сформировать автономную шкалу времени на борту космического аппарата, сопоставимую с характеристиками атомных часов и обладающей при этом лучшей долговременной стабильностью.

Такой репер частоты и времени предлагается использовать как функциональное дополнение орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС для повышения автономности системы в целом.

Заключение

Предложен алгоритм формирования автономной бортовой шкалы времени космического аппарата с использованием технологии приёма и обработки излучения пульсаров. На интервалах более трех лет хронометрирования излучения пульсаров возможно сформировать автономную шкалу времени, сопоставимую с атомными часами.

Нахождение высокостабильного репера частоты в околоземном космическом пространстве даст возможность сравнения локальных шкал времени НКА ГЛОНАСС с космическим эталоном для их коррекции или фразировки, что значительно разгрузит наземный комплекс управления и повысит автономность ГНСС в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алёшкин А. П., Бакурский К. В., Макаров А. А., Цыкунов В. Н. Способ улучшения качественных показателей навигационного поля ГНСС ГЛОНАСС на основе формирования бортовой групповой шкалы времени // Навигация и гидрография. – 2018. – № 54. – С. 7–15.
2. Пульсар: Природный эталон времени – пространства / Авраменко А. Е. – М: Ленанд, 2015. – 200 с.
3. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Шабшаевич В. С. , Дмитриев П. П. , Иванцевич Н. В. и др. под ред. В. С. Шабшаевич. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
4. Илясов Ю. П., Кузьмин А. Д., Шабанова Т. В., Шитов Ю. П. Пульсарная шкала времени // Пульсары. – М.: Наука, 1989. (Труды ФИАН. – Т. 199). – С. 149.
5. Бисноватый-Коган Г. С., Комберг Б. В. Пульсары и тесные двойные системы // Астрономический журнал. – 1974. – Т. 51. – С. 373–381.
6. Авраменко А. Е. Нейтронная звезда: от экстремальной турбулентности вспышки сверхновой к эталонной монотонности когерентного излучения пульсара. – Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Сер. Естественные науки. – 2015. – № 5. – С. 23–37.
7. Жаров В. Е., Орешко В. В., Потапов В. А., Пширков М. С., Родин А. Е., Сажин М. В. Пульсарная шкала времени // Астрономический журнал. – 2019. – Т. 96. – № 2. – С. 120–143.
8. Handbook of pulsar astronomy / D. R. Lorimer, M. Kramer. – New York: Cambridge University Press, 2005. – 301 p.

THE ALGORITHM OF FORMATION OF AN AUTONOMOUS ONBOARD TIME SCALE OF THE SPACECRAFT USING THE TECHNOLOGY OF RECEIVING AND PROCESSING RADIATION OF PULSAR IN THE INTERESTS OF TIME-FREQUENCY SUPPORT OF GLONASS

V. N. Tsykunov (A. F. Mozhaisky Military Space Academy)

The article proposes an algorithm for the formation of an Autonomous onboard time scale of the spacecraft based on the reception and processing of neutron stars radiation (pulsars) to maintain quality indicators of the time-frequency support of the GLONASS global navigation satellite system.

УДК 629.12.053

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ТАХОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

К. А. ВИНОГРАДОВ, С. И. ИВАНОВ
(АО «АКВАМАРИН»)

Предложен способ повышения точности определения относительной скорости автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) по оборотам его гребного винта. Приводятся результаты проверки предложенного способа по данным, полученным на морских испытаниях опытного образца модуля навигации АНПА «Юнона».

Для определения скорости морского подвижного объекта (МПО) относительно воды (относительной скорости) в ряде случаев используется тахометрические способ, заключающийся в определении скорости и пройденного расстояния по числу оборотов гребного винта [1]. При этом наиболее часто используются суммарные счетчики оборотов гребного винта, отмасштабированные в соответствующих единицах измерения. Масштабным коэффициентом служит аванс:

$$a = V_{\text{отн}}/n, \tag{1}$$

где $V_{\text{отн}}$ – относительная скорость, n – частота вращения гребного винта. При этом величина аванса определяется для каждого скоростного режима, как правило, по результатам юстировки относительного лага.

Основным недостатком тахометрического способа является существенная зависимость точности определения скорости от условий плавания, в первую очередь, от изменения курса, углов качек и вертикальной составляющей вектора абсолютной скорости. По данным справочника [1] даже при плавании в штилевых условиях погрешность тахометрических лагов составляет около 1 %. Поэтому его авторы нашли применение данному способу только на малых катерах, моторных лодках и других подобных средствах, плавание которых происходит в штилевых или близких к ним условиям и не требует высокой точности измерения скорости. На всех других МПО тахометрический способ определение относительной скорости является резервным [2].

Использование тахометрического способа как резервного для определения относительной скорости особенно актуально для высокоманевренных автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) малого класса, предназначенных для использования подо льдом. На АНПА этого класса практически невозможно установить резервный лаг. В то же время при выходе из строя основного лага в режиме подледного плавания необходимо обеспечить приход АНПА в заданную (свободную ото льда) точку всплытия, что без определения его относительной скорости представляется достаточно проблематичным.

Таким образом, встает задача разработки методов повышения точности определения относительной скорости подобных АНПА тахометрическим способом и ее оценки в реальных условиях плавания.

Для повышения точности определения составляющих вектора относительной скорости тахометрическим способом представляется целесообразным компенсировать влияние качки и вертикальной составляющей вектора абсолютной скорости. При этом могут быть использованы выражения, аналогичные приведенным в справочнике [1] для гидроакустического доплеровского лага:

$$V_{x\ \text{отн}} = \frac{a \cdot n + V_z \cdot \sin\psi}{\cos\psi}; \tag{2}$$

$$V_{y\ \text{отн}} = \Delta K \cdot V_{x\ \text{отн}} - \text{tg}\Theta \cdot \sin\psi \cdot V_{x\ \text{отн}}, \tag{3}$$

где a – аванс; n – частота вращения винта; V_z – вертикальная составляющая вектора абсолютной скорости; ψ и Θ – углы дифферента и крена, соответственно; $\Delta K = K_i - K_{i-1}$ – изменение курса.

Поскольку в подводном положении перемещений АНПА под воздействием ветрового дрейфа нет, то воздействия течения на поперечную составляющую вектора относительной скорости практически не будет, и ее значение будет определяться в основном изменением курса.

Проверку предложенного способа проведем по данным, полученным на морских испытаниях разработанного АО «АКВАМАРИН» (г. Санкт-Петербург) опытного образца субмодуля навигации (СМН) АНПА «Юнона»

В состав СМН АНПА «Юнона» входят (рис. 1) [3]:

– разработанная АО «АКВАМАРИН» система определения скорости и глубины (СОСГ), построенная на базе гидроакустического доплеровского лага;

– разработанная ООО «НПК «Электрооптика» (г. Москва) лазерная бесплатформенная инерциальная навигационная система БИНС-18К.

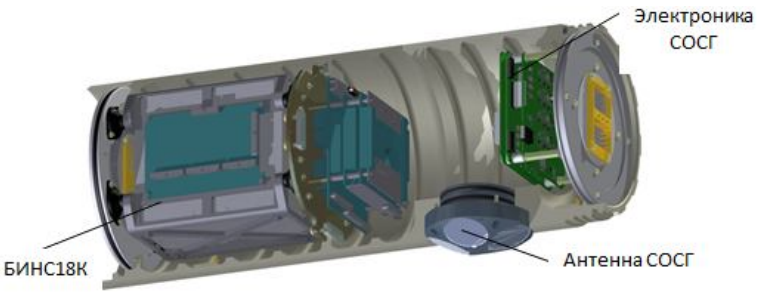


Рис. 1. Субмодуль навигации АНПА «Юнона»
(диаметр 200 мм, водоизмещение 18,1 дм^3, масса в воздухе 13,8 кг)

Ниже приведены подтвержденные на испытаниях технические характеристики указанных систем [3], необходимые для проведения оценки точности определения относительной скорости АНПА тахометрическим способом.

Технические характеристики СОСГ:

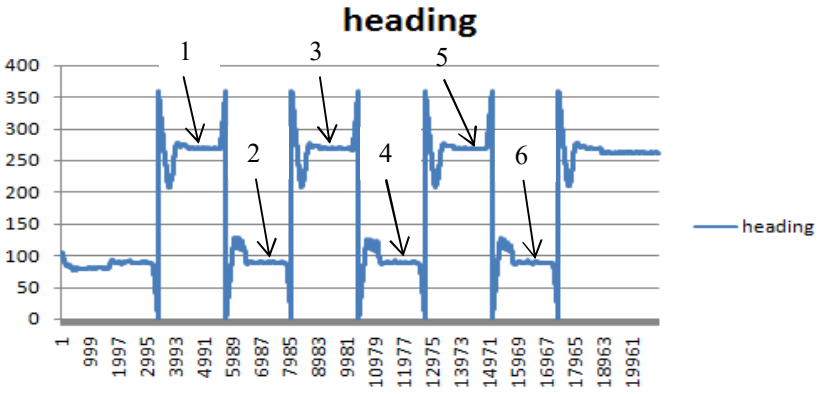
Диапазон определения продольной и поперечной составляющих вектора абсолютной скорости АНПА, уз	± 6
Средняя квадратическая погрешность (СКП) определения горизонтальных составляющих вектора абсолютной скорости, уз, не более:	
– продольная составляющая	0,003
– поперечная составляющая	0,009

Технические характеристики БИНС-18К:

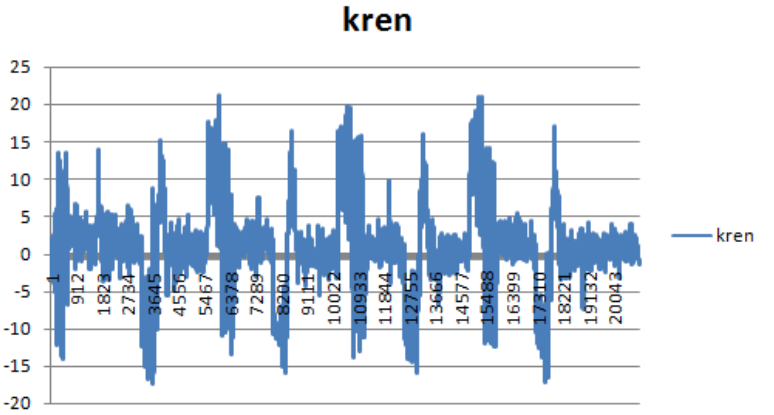
Погрешность определения угловой ориентации АНПА, угл. мин., не более:	
– истинного курса	1,5
– крена и дифферента	0,5

Значения вертикальной составляющей вектора абсолютной скорости АНПА «Юнона» определялись по данным разработанного АО «АКВАМАРИН» датчика гидростатического давления (ДГД), обеспечивающего ее определение с СКП не более 0,01 уз.

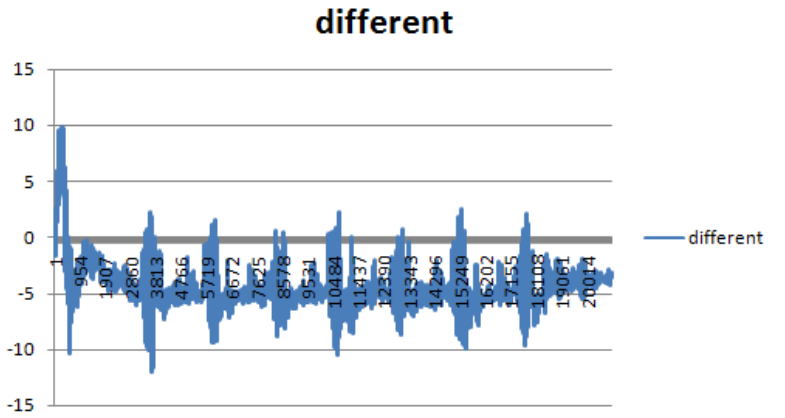
Оценим точности определения относительной скорости АНПА тахометрическим способом по данным, полученным при испытаниях АНПА «Юнона» на Черном море по одному из галсов (рис. 2 и 3) при движении на глубине около 2 м в районе с глубинами около 9 м.



а

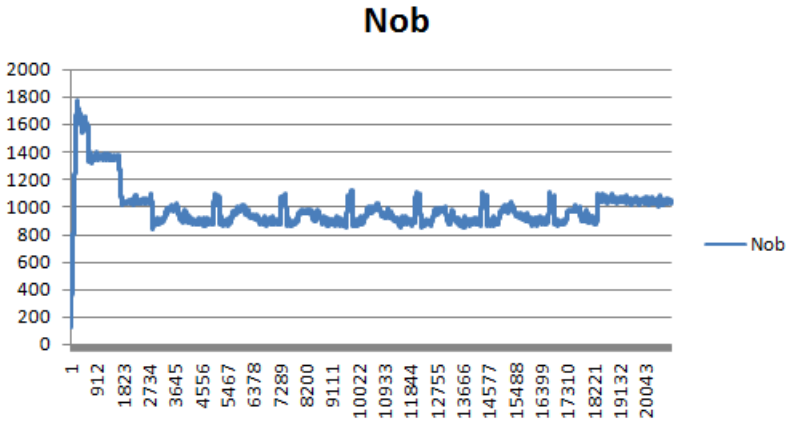


б

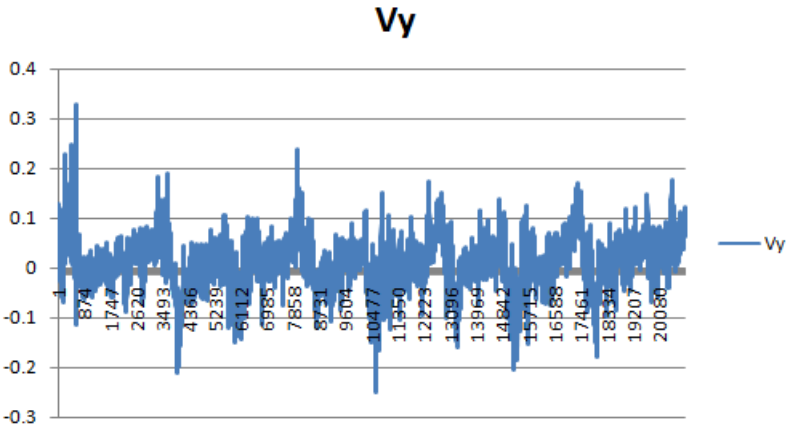


в

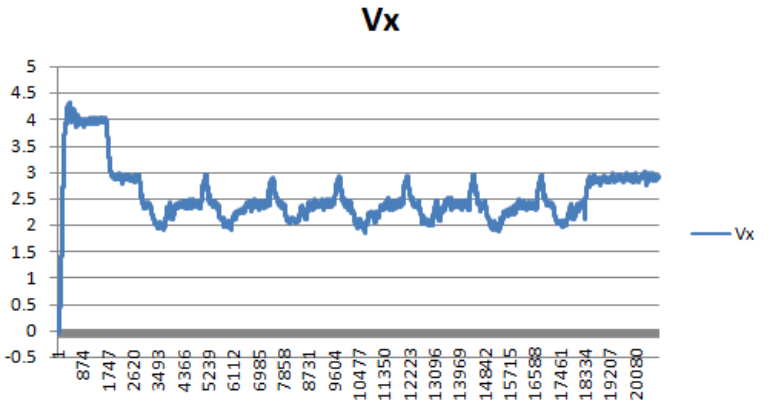
Рис. 2. Изменение параметров движения АНПА на галсе: *а* – курса, град.; *б* – угла бортовой качки, град.; *в* – угла килевой качки, град. По горизонтальной оси показаны номера отсчетов



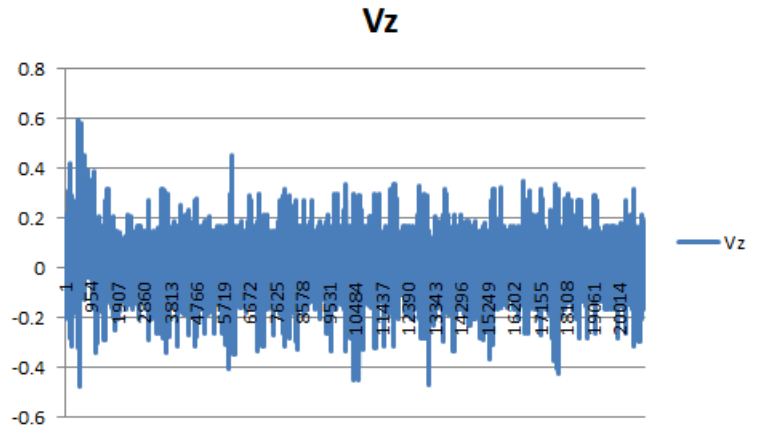
а



б



в

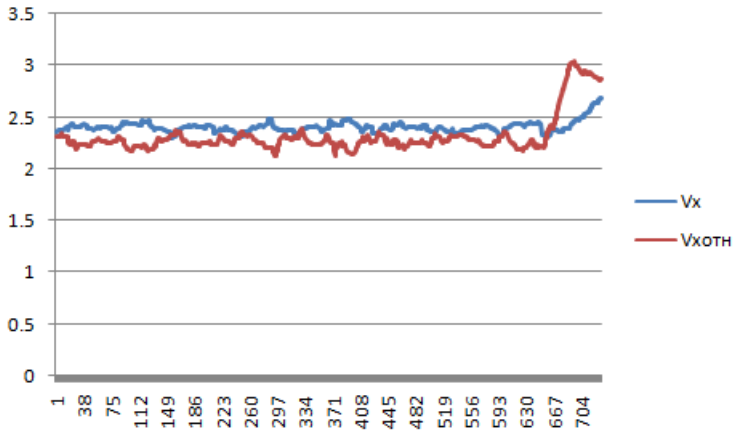


г

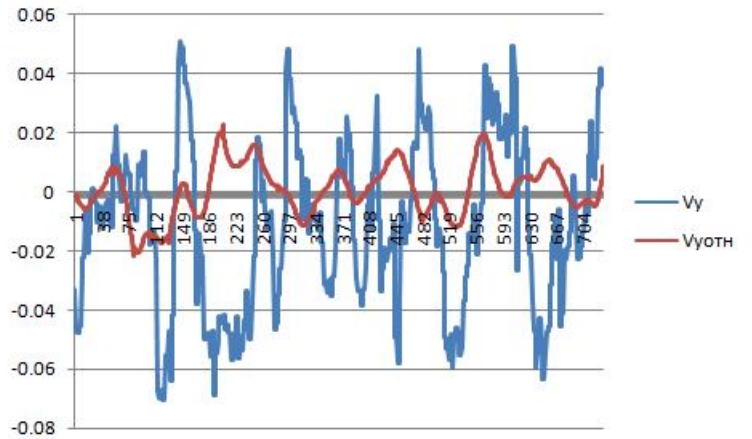
Рис. 3. Изменение параметров при движении АНПА: *а* – частоты вращения винта (оборот/мин.); *б–г* – составляющих вектора абсолютной скорости АНПА на галсе (*б* – продольной, уз; *в* – поперечной, уз; *г* – вертикальной, уз). По горизонтальной оси показаны номера отсчетов

Анализ данных, приведенных на рис. 2 *а*, показывает, что в середине данного галса АНПА выполнил по три пробега на постоянных курсах примерно 270° (1, 3 и 5) и 90° (2, 4 и 6). Поэтому дальнейшую оценку целесообразно проводить по данным, полученным на этих пробегах.

На рис. 4 приведены значения продольной и поперечной составляющих векторов абсолютной (по СОСГ) и относительной (рассчитанных по формулам (2) и (3)) скоростей АНПА на пробеге 1.



а



б

Рис. 4. Изменения продольной, уз (*а*) и поперечной, уз (*б*) составляющих векторов абсолютной и относительной скоростей на пробеге 1:
абсолютная скорость; относительная скорость

Анализ данных, приведенных на рис. 4, показывает качественное соответствие изменений указанных скоростей. При этом относительно большая разность между значениями поперечных составляющих векторов абсолютной и относительной скоростей АНПА, вероятно, связана с воздействием волнения моря на неглубоко погруженный маломерный аппарат.

Для проведения дальнейших оценок в табл. 1 приведены данные (средние значения и средние квадратические отклонения (СКО)), полученные на каждом из шести пробегов. При этом аванс определялся по формуле:

$$a = -6{,}9387 \cdot 10^{-4} + 5{,}6194 \cdot 10^{-6} \cdot Nob_i - 2{,}2276 \cdot 10^{-9} \cdot Nob_i^2 \ ,$$

полученной по результатам испытаний для диапазона скоростей подводного хода АНПА (1,75 - 3,85) уз.

Таблица 1

Данные по пробегам

Параметр		Пробег 1	Пробег 2	Пробег 3	Пробег 4	Пробег 5	Пробег 6
Курс, град.	среднее	270,4	89,7	270,3	89,6	269,5	89,6
	СКО	1,8	1,5	1,6	0,9	0,8	1,2
Изменение курса за 0,2с, град.	среднее	-0,00012	-0,00016	-0,00009	0,00002	0,00007	0,00003
	СКО	0,00070	0,00120	0,00063	0,00058	0,00050	0,00055
Крен, град.	среднее	0,3	1,4	-0,0	1,0	-0,0	2,0
	СКО	2,1	2,8	1,9	2,0	1,8	1,7
Дифферент, град.	среднее	-5,0	-5,1	-5,0	-5,0	-4,8	-5,1
	СКО	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9
Обороты *n*, об./мин.	среднее	900,5	908,6	917,6	925,4	920,4	921,2
	СКО	47,0	48,0	64,8	65,7	64,8	60,7
Аванс а, уз · мин./об.	среднее	0,002552	0,002568	0,002578	0,002589	0,002582	0,002584
	СКО	0,000062	0,000064	0,000086	0,000086	0,000085	0,000079
$V_{x\,абс}$, уз.	среднее	2,4045	2,3953	2,4540	2,4887	2,4842	2,4598
	СКО	0,0530	0,0961	0,1375	0,1810	0,1761	0,1787
$V_{y\,абс}$, уз.	среднее	-0,0118	0,0174	-0,0011	0,0047	0,0189	0,0100
	СКО	0,0287	0,0351	0,0330	0,0330	0,0295	0,0324
$V_{z\,абс}$, уз.	среднее	0,0066	0,0049	0,0041	0,0063	-0,0012	0,0036
	СКО	0,1365	0,1297	0,1205	0,1306	0,1262	0,1182

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что максимальные значения параметров угловой ориентации АНПА на пробегах составляли:

– рыскание АНПА – 1,8° (пробег 1);
– изменение курса за 0,2 с – минус 0,00016° (пробег 2);
– угол крена – 2,0° (пробег 6);
– амплитуда бортовой качки – 8,4° (пробег 2);
– угол дифферента – минус 5,1° (пробеги 2 и 6);
– амплитуда килевой качки – 2,7° (пробег 6).

При этом среднее значение вертикальной составляющей абсолютной скорости АНПА достигало 0,0066 уз, а ее СКО – 0,1365 уз (пробег 1).

В табл. 2 приведены значения относительной скорости АНПА, рассчитанные по формулам (1) – (3) и традиционным способом, который используется при юстировке относительных лагов [2, 4].

Таблица 2

Значения относительной скорости АНПА

Параметр		Пробег 1	Пробег 2	Пробег 3	Пробег 4	Пробег 5	Пробег 6
$V_{x\,отн\,по\,(1)}$, уз.	среднее	2,2981	2,3333	2,3656	2,3765	2,3804	2,3803
$V_{x\,отн\,по\,(2)}$, уз.	среднее	2,3123	2,3453	2,3798	2,4105	2,3907	2,3951
$V_{x\,отн}$, уз. *	среднее	2,4123			2,4792		
$V_{y\,отн\,по\,(3)}$, уз.	среднее	0,0007	0,0049	-0,0005	0,0042	-0,0002	0,0077
$V_{y\,отн}$, уз.**	среднее	0,0055			0,0131		

$^{*}\,V_{x\,отн} = \frac{V_{x\,абс\,i}+2V_{x\,абс\,i+1}+V_{x\,абс\,i+2}}{4}$; $^{**}\,V_{y\,отн} = \frac{V_{y\,абс\,i}+2V_{y\,абс\,i+1}+V_{y\,абс\,i+2}}{4}$

Оценим погрешности определения составляющих вектора относительной скорости АНПА тахометрическим способом.

В соответствии с [5] суммарное СКО оценки составляющей вектора относительной скорости может быть определено по выражению вида:

$$M_{V(x,y)\text{отн}} = \left(\frac{\Delta V^2_{(x,y)\ \text{отн}}}{3} + \sigma V^2_{(x,y)\ \text{отн}}\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (4)$$

где $\Delta V_{(x,y)\ \text{отн}} = V_{(x,y)\text{отн эт}} - V_{(x,y)\text{отн по (1)или (2)}}$ – неисключенная систематическая погрешность определения соответствующей составляющей вектора относительной скорости; $\sigma V_{(x,y)\ \text{отн}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta V^2_{\text{отн}\ (x,y)i} - n \cdot \Delta V^2_{\text{отн}\ (x,y)\ \text{ср}}}{n}}$ – случайная погрешность определения соответствующей составляющей вектора относительной скорости. При этом за $V_{(x,y)\text{отн эт}}$ принимаем значения соответствующей составляющей вектора относительной скорости АНПА, рассчитанные традиционным способом [2].

Результаты оценки погрешности определения составляющих вектора относительной скорости АНПА тахометрическим способом с учетом данных табл. 2 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценки погрешности определения составляющих вектора относительной скорости АНПА тахометрическим способом

Погрешность	По (1)	По (2)	По (3)
$\Delta V_{(x)\ \text{отн}}$, уз.	0,0901	0,0735	-
$\sigma V_{(x)\ \text{отн}}$, уз.	0,0220	0,0215	-
$M_{V(x)\text{отн}}$, уз.	0,0565	0,0474	-
$\Delta V_{(y)\ \text{отн}}$, уз.	-	-	0,0065
$\sigma V_{(y)\ \text{отн}}$, уз.	-	-	0,0039
$M_{V(y)\text{отн}}$, уз.	-	-	0,0054

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что при движении АНПА в подводном положении со следующими динамическими параметрами:

– рыскание до 1,8° (изменение курса за 0,2 с до 0,00016°;
– угол крена до 2,0° (амплитуда бортовой качки до 8,4°);
– угол дифферента до минус 5,1° (амплитуда килевой качки до 2,7°);
– вертикальная составляющая абсолютной скорости АНПА до 0,0066 уз.

СКО оценки продольной составляющей вектора его относительной скорости тахометрическим способом составляет около 0,05 уз (около 2% от ее текущего значения).

При этом в указанных условиях плавания уменьшение погрешности определения продольной составляющей вектора относительной скорости при учете динамики движения АНПА составляет около 0,01 уз, что в случае определения относительной скорости является несущественным. Вместе с тем учет динамики движения позволяет оценить на маневрах курсом и глубиной погружения

поперечную составляющую вектора относительной скорости АНПА с СКО на уровне 0,005 уз.

Приведенные значения погрешностей являются оценкой «сверху», о чем свидетельствует достаточно большие величины неисключенных систематических погрешностей (табл. 3) определения составляющих вектора относительной скорости. В первую очередь, по нашему мнению, это произошло из-за того, что в системе управления АНПА «Юнона» реализован только режим поддержания постоянной скорости, и отсутствует режим поддержания постоянства оборотов движителя, требуемый при проведении юстировки относительных лагов [4].

Таким образом, тахометрический способ дает возможность определять не только поперечную, но и продольную составляющие вектора относительной скорости АНПА в подводном положении, что, по нашему мнению, позволяет использовать его в качестве резервного способа определения скорости при выходе из строя установленного на АНПА штатного лага.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов К. А., Кошкарев В. Н., Осюхин Б. А. и др. Абсолютные и относительные лаги. Справочник. – Л.: Судостроение, 1990. – 263 с.
2. Практическое кораблевождение. Книга первая / Отв. ред. А. П. Михайловский – Б.м. ГУНиО МО, 1988 (№ 90351).
3. Виноградов К. А., Назаров С. И. Опыт создания навигационной системы для автономного необитаемого подводного аппарата // Сб. мат. XIV Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Ростов-на-Дону – Таганрог, 2019. – С. 337–345.
4. Правила определения маневренных элементов кораблей военно-морского флота (ПОМЭК-85). – Л.: ГУНИО МО СССР, 1987. – 200 с.
5. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. ГОСТ Р 8.736-2011. – М.: Стандартинформ, 2013.

ON DETERMINING THE RELATIVE SPEED OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES BY TACHOMETRIC METHOD

K. A. Vinogradov, S. I. Ivanov («AQUAMARIN» JSC)

A method for increasing the accuracy of determining the relative velocity of the Autonomous underwater vehicle by the revolutions of its propeller is proposed. The results of verification of the proposed method according to the data obtained at marine tests of the prototype of the navigation module Autonomous underwater vehicle «Junona» are presented.

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

УДК 528.92

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА МОРСКОМ ДНЕ ПО ДАННЫМ МНОГОЛУЧЕВЫХ ГИДРОЛОКАТОРОВ

В. Ю. БАХМУТОВ, Ю. Н. ЖУКОВ
(АО «ГНИНГИ»)

Приведен метод автоматизированного обнаружения объектов на морском дне по данным многолучевых гидролокаторов. Метод использует алгоритмы машинного зрения: выделение границ, преобразование Радона, алгоритм топологической морфологии. Метод позволяет с 95 %-ой вероятностью выявить объекты на дне и определить их местоположение.

В настоящее время широкое применение в гидрографии имеют все типы гидролокаторов: многолучевые эхолоты (МЛЭ), гидролокаторы бокового обзора (ГБО), гидролокаторы секторного обзора (ГСО). Активное внедрение этих гидролокаторов в различные области морской геодезии и гидрографии связано с тем, что они являются высокоточными инструментами, позволяющими выполнять не только промеры глубин, но и служить средством для обнаружения подводных объектов.

Решение задачи выявление объектов, находящихся на дне, при обследовании больших площадей с помощью прямых визуальных методов затруднительно, так как технические средства гидролокаторов производят чрезвычайно большой поток измерительных данных. Кроме того, объекты, находящиеся на дне, камуфлированы осадочным материалом, что делает их визуально плохо различимыми.

Существенно снизить нагрузку на экспертов может применение предварительного автоматизированного обнаружения участков поверхности дна, на которых, возможно, находятся некоторые объекты, с последующим визуальным контролем только таких участков.

Естественно применить для разработки автоматизированных методов обнаружения объектов на дне моря компьютерное зрение – раздел искусственного интеллекта, алгоритмы которого позволяют компьютеру выполнять задачи, связанные с визуальным определением объектов: находить, отслеживать, классифицировать и идентифицировать объекты, извлекая данные из изображений и анализируя полученную информацию.

Алгоритмы компьютерного зрения широко используется в автоматизированных методах робототехники, сейсмоакустики, навигации и гидрографии. Так, например, в навигации они применяются в автоматизированных

методах обнаружения горизонта в системах управления беспилотными морскими кораблями [1], а в гидрографии – в автоматизированных методах исключения полосового шума, артефактов линии трека и ошибок, вызванных движением корабля, в данных измерений многолучевыми гидролокаторами [2].

В данной статье излагается метод детектирования объектов на дне моря по данным многолучевых гидролокаторов на основе алгоритмов компьютерного зрения. Этот метод выявляет аномалии в поле глубин и с большой долей вероятности классифицирует их как объекты. Метод можно расширять, обобщая его до сложных методов, обладающих способностью отслеживания, классифицирования и идентификации объектов.

В поле изменчивости глубин морского дна объекты, находящиеся на дне, являются некоторыми аномалиями. Геометрическая форма этих аномалий зависит от размеров объекта. Традиционно геометрические формы объектов делятся на точечные, линейные и площадные. Примерами точечных объектов могут служить вертикально опоры инженерных конструкций небольшого диаметра, линейных – трубопроводы и кабели, площадных – затопленные баржи и элементы техногенного рельефа, имеющие достаточно простые геометрические формы.

Эта классификация достаточно условна. Дело в том, что измерения морского дна многолучевыми гидролокаторами представляют собой эквидистантные массивы точечных глубин, называемых гридами (которые полностью идентичны растрам изображений в оттенках серого цвета). Элемент такого массива представляет собой некоторое усредненное значение глубины по площади. Величина площади осреднения зависит от многих причин, в том числе, и от глубины места – чем больше глубина, тем больше площадь усреднения, и наоборот. При этом подводные объекты отображаются на конечном множестве точек грида. Число точек этого множества прямо пропорционально площади объекта. Поэтому, например, площадь одного и того же типа баржи при малых глубинах будет занимать в гриде промера несколько рядом расположенных точек и относиться к площадному типу, а на больших глубинах этот же тип баржи будет отображаться одной точкой грида и относится к точечному объекту.

Таким образом, аномалии глубин в данных многолучевых гидролокаторов, образующихся за счет объектов на морском дне, могут быть представлены либо одной точкой, либо цепочкой близко расположенных точек – «облаком» рядом расположенных точек. Наличие донных осадков на объектах камуфлирует соответствующие аномалии в поле рельефа дна, поэтому цепочка точек, на которых прослеживается аномалия глубин, может «прерываться». Мощность осадочного слоя является шумовой составляющей в задаче автоматизированного обнаружения объектов.

На рис. 1 приведен пример грида рельефа дна с различными геометрическими типами объектов на дне моря.

Предлагаемый метод детектирования аномалий глубин с использованием алгоритмов компьютерного зрения включает выполнение трех основных этапов: выявление границ аномалий, приведение линейных участков границ к точечным, проведение пороговой фильтрации, результат которой определяет наличие или отсутствие объектов.

Опишем основные алгоритмы, представляющие эти этапы метода.

1. *Выявление границ аномалий* является этапом первичной предобработки исходных данных для выявления аномалий в форме измеренного рельефа дна моря. Очевидно, что объекты, расположенные на дне, будут давать относительно резкие скачки в измеренных глубинах на своих границах. Визуально человек также распознает объекты по их границам в поле глубин рельефа.

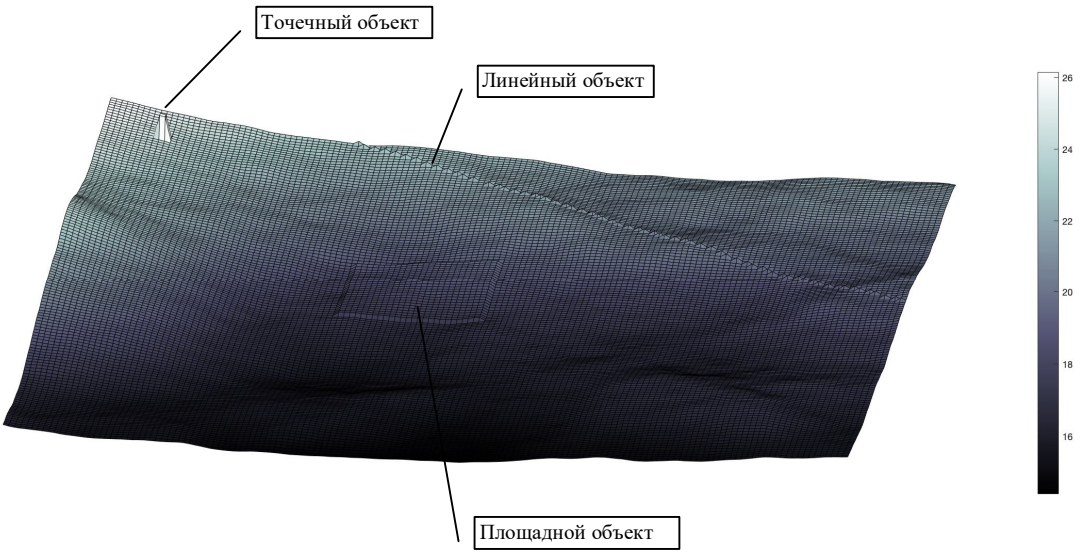


Рис. 1. Пример грида рельефа дна с различными геометрическими типами объектов на дне моря

Существует множество алгоритмов выделения границ [3]. Проведенные авторами вычислительные эксперименты показали, что наиболее эффективным для указанных целей является алгоритм перекрестного оператора Робертса, который вычисляет на плоском дискретном гриде глубин, сумму квадратов разности между диагонально смежными точками. Иными словами, величина перепада $G(x, y)$ получаемого изображения вычисляется из исходных значений глубины $h(x, y)$ в дискретных точках растра с координатами (x, y) по правилу:

$$G_1(x, y) = h(x, y) - h(x+1, y+1),$$

$$G_2(x, y) = h(x+1, y) - h(x, y+1),$$

$$G(x, y) = \sqrt{G_1^2 + G_2^2}\ . \qquad (1)$$

Оператор (1) почти равносилен вычислению конечных разностей вдоль координат x и y и дает линии тоньше, чем другие методы выделения границ. На рис. 2 приведен результат применения оператора (1) к массиву глубин, представленных на рис. 1.

2. Вторым, главным, этапом является *приведение линейных участков границ к «точечным объектам»*. Исходными данными для него являются результаты первого этапа. Для этого в области компьютерного зрения используется специальный алгоритм – преобразование Радона (Radon transform).

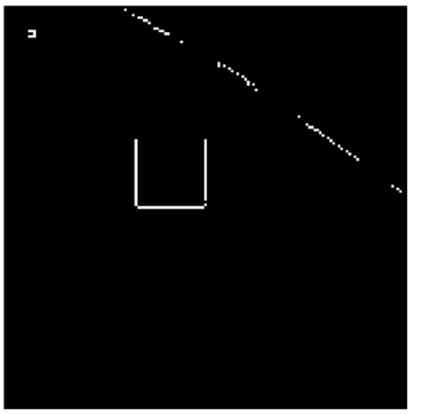


Рис. 2. Результат применение оператора Робертса к массиву глубин, приведенному на рис. 1.

Преобразование Радона (Иоганн Карл Август Радон, 1887–1956) – это интегральное преобразование функции многих переменных, родственное преобразованию Фурье. Заметим, что преобразование Радона – математическая основа компьютерной томографии.

Выбор преобразования Радона обусловлен тем, что оно преобразует проблему обнаружения линий в области изображения границ в более простую проблему обнаружения пиков в области параметров даже на очень шумных изображениях.

Классическое определения преобразования Радона для непрерывного случая дается следующим образом. Пусть $f(x,y)$ – это функция двух действительных переменных, определенная на всей плоскости и достаточно быстро убывающая на бесконечности (так, чтобы соответствующие несобственные интегралы от этой функции сходились). Тогда преобразованием Радона функции называется функция

$$R(\rho,\theta)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\delta(\rho - x\cos\theta - y\sin\theta)dxdy, \qquad (2)$$

где δ – дельта-функция Дирака, ρ – нормальное уравнение прямой

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta, \qquad (3)$$

перпендикуляр к которой в начале координат образует угол θ (рис. 2).

Преобразование Радона имеет простой геометрический смысл – это интеграл от двумерной функции вдоль прямой, перпендикулярной единичному вектору $\mathbf{n}=(\cos\theta,\sin\theta)$, имеющему угол θ в начале координат и проходящей на

расстоянии ρ от начала координат, измеренного вдоль единичного вектора **n** с соответствующим знаком. На рис. 3 представлена иллюстрация преобразования Радона для двух углов θ.

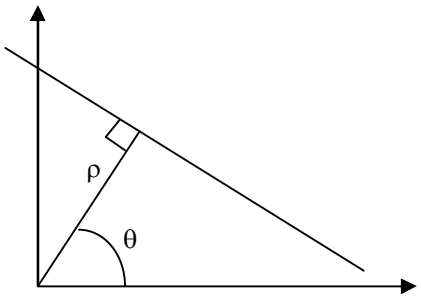


Рис. 2. Иллюстрация двух параметров, используемых в определении прямой (3)

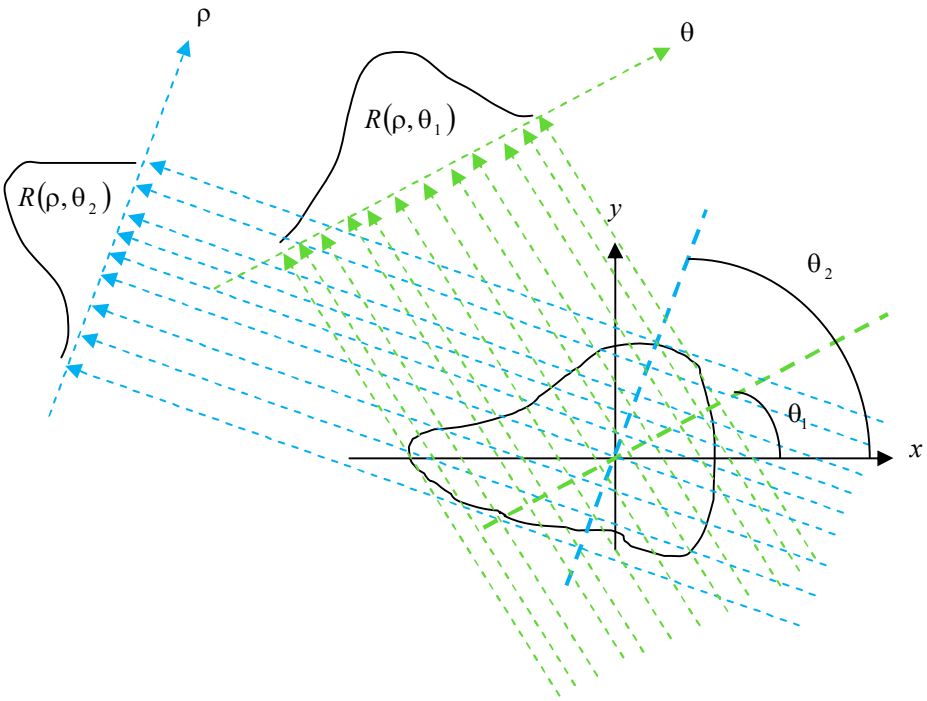


Рис. 3. Иллюстрация геометрического смысла преобразования Радона двумерной функции

Одним из свойств преобразования Радона является то, что оно переводит некоторую прямую на плоскости с параметрами (ρ^*, θ^*) в некоторую точку в пространстве координат Радона – (ρ_0, θ_0). Это можно понять, не проводя математических выкладок. Действительно, для заданной прямой с параметрами (ρ^*, θ^*) интеграл (2) от этой прямой будет иметь малые значения для всех прямых

интегрирования (3), для которых $(\rho,\theta)\neq(\rho^*,\theta^*)$. И только при равенстве $(\rho,\theta)\equiv(\rho^*,\theta^*)$ величина интеграла (2) будет велика, так как в этом случае прямая, по которой осуществляется интегрирование, будет совпадать с заданной прямой (ρ^*,θ^*). Очевидно, что точки (ρ^*,θ^*) и (ρ_0,θ_0) совпадают. При этом значение интеграла $R(\rho,\theta)$в точке (ρ^*,θ^*) будет максимальным. Другими словами, в точке (ρ^*,θ^*) будет сосредоточена практически вся масса интеграла (2), т. е. в этой точке будет расположен пик в значениях функции $R(\rho,\theta)$ и $\max\limits_{\rho,\theta}(R(\rho,\theta))=R(\rho^*,\theta^*)$. В нашей задаче это самое важное свойство преобразования Радона. Именно с помощью этого свойства представляется возможность автоматически выделить границы объектов, а в конечном итоге – и сами объекты.

В нашем случае преобразование Радона следует понимать как дискретное линейное отображение (оператор) матрицы выделенных границ $G(x,y)$ в некоторую другую матрицу $R(\rho,\theta)$.

Пример преобразования Радона матрицы границ, представленной на рис. 2, дан на рис. 4.

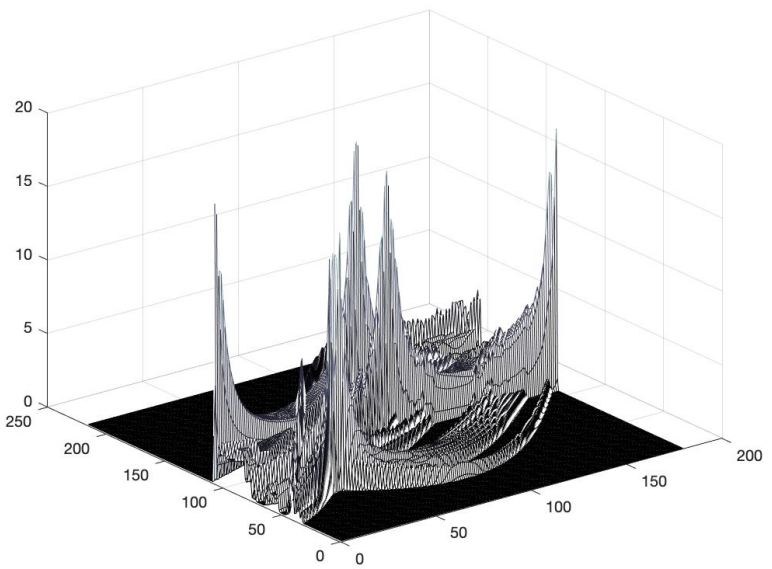


Рис. 4. Преобразование Радона матрицы границ, представленной на рис. 2

Таким образом, результатом преобразования Радона матрицы границ $G(x,y)$ будет двумерная функция $R(\rho,\theta)$ с высокими пиками, которые соответствуют линиям границ.

За детектированием этих пиков отвечает третий этап автоматизированного метода обнаружения объектов на морском дне по данным многолучевых гидролокаторов.

3. На третьем этапе для выявления пиков, соответствующих границам объектов, используется *алгоритмы пороговой фильтрации* [4] и *цифровой морфологии* [3].

В работе [5] получено выражения для порога μ значений высоты пиков преобразования Радона $R(\rho,\theta)$, который с 95 %-ой вероятностью соответствует наличию границ объектов.

$$\mu = \frac{\delta}{653\sqrt{L}}, \tag{4}$$

где δ – среднеквадратическая изменчивость отображения выделенных границ, L – линейный размер исходного грида в точках.

Преобразование Радона границ фильтруется на уровне, соответствующем выражению (4), то есть в матрице значений $R(\rho,\theta)$ элементы которые выше значения (4), заменяются на единичное значение, а остальные элементы обнуляются. На рис. 5 приведен пример фильтрации значений $R(\rho,\theta)$, данных на рис. 4.

Рис. 5. Результаты двумерной фильтрации значений $R(\rho,\theta)$, приведенных на рис. 4. Здесь $L = 151$, $\delta = 0{,}074$, $\mu = 14{,}93$

Для оценки числа вероятных объектов к результату пороговой фильтрации применяют алгоритм Хошена-Копельмана (Hoshen–Kopelman). Это алгоритм цифровой морфологии [3], представляющий собой автоматизированный метод анализа и обработки геометрических структур для выделения связных областей, основанный на теории множеств. В результате применения этого алгоритма к

соответствующей матрице значений на рис. 5 получим, что число связных объектов на рисунке равно семи.

Очевидно, что использование алгоритма Хошена-Копельмана дает возможность определить не только число объектов, но и их местоположение. Для оценки координат местоположения необходимо применять преобразования, связывающие дискретные значения (x, y) и (ρ, θ), приведенные, например, в работе [6].

Следует уточнить требования к исходным данным. Решение этой задачи требует, чтобы грид исходных данных был прямоугольной областью и во всех внутренних точках области было задано значение глубины. Требование прямоугольности необременительное, так как всегда любую область дна можно вложить в прямоугольник и в добавленных точках задать значения минимальной глубины исходного грида. Однако это требование предполагает и требование отсутствия пропусков измерений глубин в исходном гриде. Последнее достаточно сложно удовлетворить, так как необходимо вначале выявить такие пропуски, а затем провести интерполяцию в них. Решение этой задачи требует отдельного рассмотрения.

Изложенный метод следует применять не для всего прямоугольника грида, а для прямоугольного скользящего окна с линейным размером в пределах 100–500 точек.

Программным инструментом для реализации изложенного метода может служить пакет OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) – библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом. Эта библиотека входит во множество языков программирования, например, C/C++, Python, Java, Ruby, Matlab, Lua и других.

Таким образом, представлен автоматизированный метод обнаружения объектов на морском дне по данным многолучевых гидролокаторов, который позволяет детектировать объекты и определять их местоположение. Предполагается, что результаты работы алгоритма будут визуально оценены экспертами. Эффективность предложенного метода связана с уменьшением площади дна, которое необходимо обследовать визуально экспертами.

Предложенный метод возможно совершенствовать путем добавления методов обучения и распознавания с помощью алгоритмов искусственных нейронных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prasad D. K., Rajan D., Rachmawati L., Rajabally E., Quek C. MuSCoWERT: multi-scale consistence of weighted edge Radon transform for horizon detection in maritime images // Journal of the Optical Society of America. – 2016. – Vol. 33. – No. 12. – Pp. 2491–2500.
2. Landmark K., Solberg A. H. S., Albregtsen F., Austeng A., Hansen R. E. A Radon-Transform-Based Image Noise Filter – with Applications to Multibeam Bathymetry // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2015. – Vol. 53. – No. 11. Pp. 6252– 6273.
3. Parker J. R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision, New York, John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 480 p.
4. Хелгасон С. Преобразование Радона. – М.: Мир, 1983. – 150 с.
5. Toft P. A. Using the generalized Radon transform for detection of curves in noisy images // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1996. – Vol. 4. – Pp. 2221–2225.
6. Toft P. A. The Radon Transform – Theory and Implementation. – Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (DTU), 1996. – 327.

AN AUTOMATED METHOD FOR DETECTING OBJECTS ON THE SEABED ACCORDING TO MULTIBEAM SONAR

V. Yu. Bakhmutov, Yu. N. Zhukov («GNINGI» JSC)

The method of automated detection of objects on the seabed according to multibeam sonar is given. The method uses machine vision algorithms: boundary detection, Radon transformation, topological morphology. The method allows to identify objects on the seabed with 95% probability and their location.

УДК 528.92

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ МОРЯ

Ю. Н. ЖУКОВ (АО «ГНИНГИ»),
Е. В. ФЕДОРОВА (ФГУП «ГОИН»)

Приведены основные элементы методов прогнозирования уровня моря на основе искусственных нейронных сетей. Изменчивость уровня моря представляется двумя способами: нелинейной хаотической динамикой с реконструкцией многомерного фазового пространства и многомерной скалярной функцей. Прогноз ориентирован для акваторий с незначительными приливами на основе коротких рядов эквидистантных наблюдений. Описана практическая реализация методов прогноза в виде одностраничного Web-приложения.

Освоение шельфа Арктических морей и связанные с этим технологические работы на побережье требует знания информации об уровне моря. Существующие наставления по гидрометеорологическому обеспечению (ГМО), например, Правила гидрографической службы № 35, определяют только получение данных о предвычислении приливных колебаний уровня моря. Однако реальные колебания уровня моря всегда являются суперпозицией бесконечного числа периодических колебаний, вызванных множеством различных причин. Для некоторых акваторий (например, для арктических акваторий восточнее Баренцева моря) приливные колебания составляют лишь незначительную часть (менее 50 %) в общем размахе колебаний уровня моря. Поэтому предвычисление (прогнозирование) уровня моря в акваториях с незначительными приливами представляет собой проблему, так как простое предвычисление приливов по гармоническим постоянным приводит к большим погрешностям [1].

Для акваторий с незначительными приливами, указанную проблему можно разрешить путем разработки методов прогнозирования суммарного уровня моря. В данной статье описаны методы прогнозирования уровня моря на основе методов искусственных нейронных сетей, входящих в область искусственного интеллекта. Представляемые методы отличаются от традиционных методов линейного прогнозирования ARIMA (ARFIMA) – методологии прогнозирования Бокса – Дженкинса, тем, что в них используется представление уровня моря в виде

многомерного фазового пространства и нелинейные методы прогнозирования на основе искусственных нейронных сетей. Кроме того, излагаемые методы прогнозирования ориентированы на использование небольшого интервала предварительных наблюдений – сутки.

Рассмотрим задачу предвычисления (прогнозирования) уровнем моря: по измеренному в некоторой точке акватории временному дискретному (эквидистантному) ряду наблюдений, $\{h_i\} = h_1,...,h_n$, вычислить значение уровня моря на следующий момент измерения

$$h_{n+1} = w_1 h_1,...,w_n h_n. \tag{1}$$

Здесь скалярные коэффициенты w_i определяются путем минимизации ошибки прогнозирования на обучающей последовательности:

$$h_n - (w_1 h_1,...,w_n h_n) \xrightarrow[\{w_i\}]{} \min . \tag{1'}$$

Выражения (1) – (1') определяют основной элементарный акт процесса прогнозирования. Прогноз на большее число шагов вперед осуществляется рекуррентно, то есть исходная последовательность $\{h_i\}$ модифицируется: удаляется слева первое значение, а справа добавляется предвычисленное значение h_{n+1}; затем элементарный акт прогнозирования применяется к модифицированной последовательности для прогнозирования следующего значения h_{n+2}, и так далее.

Задача прогнозирования (1) – (1') традиционно решается либо методами предвычисления приливных колебаний по гармоническим постоянным, либо методами линейного прогнозирования ARIMA (ARFIMA). В обоих случаях колебания уровня моря представляются как одномерный скалярный процесс. Действительно, с одной стороны, в гармоническом анализе приливов последовательность (1) – (1') представляет собой сумму из L косинусоид с разными фазами и амплитудами. В этом случае, как показал Лагранж, выражению $\{h_i\}$ соответствует некоторая рекуррентная последовательность Q, коэффициенты которой зависят от частот колебаний косинусоид [2, 3]. Другими словами, Q представляет собой отношение двух полиномов, т. е. рациональную функцию. Явный вид функции достаточно громоздок, чтобы его здесь привести. Число L может быть определено из того факта, что последовательность $\{h_i\}$ можно также представить в виде Ганкелевой матрицы, ранг которой равен L.С другой стороны, имеется чисто формальное соответствие между рекуррентной функцией Q и авторегрессией L-го порядка линейной динамической системы Калмана [4], к которым относятся методы ARIMA (ARFIMA).

Временной ход колебаний (суммарных) уровня моря $\{h_i\}$ в акваториях с незначительными приливами представляет собой сложную хаотическую скалярную функцию от времени и существенно отличается от циклического вида колебаний, как

в акваториях с большими устойчивыми приливами. Для прогнозирования уровня моря с таким характером колебаний более эффективно использовать искусственные нейронные сети [1]. Такие сети являются средством для вычисления многомерных нелинейных функций, то есть здесь колебания уровня моря представляются как многомерный скалярный процесс. Поэтому при использовании искусственных нейронных сетей задача (1) – (1') записывается в виде:

$$h_{n+1} = \mathbf{w}_1\mathbf{h} + \ldots + \mathbf{w}_n\mathbf{h}\,, \tag{2}$$

где $\mathbf{w}_1$ – векторы скалярных коэффициентов, определяемые по обучающей последовательности, аналогичной (2), $\mathbf{h} \equiv \{h_1,\ldots,h_n\}$.

Любая искусственная нейронная сеть представляет собой техническую реализацию идеи «черного ящика», когда на вход ящика подается конечный вектор скалярных (векторных) сигналов. С использованием внутренних нелинейностей и обучающему набору выходного скалярного (векторного) сигнала устройство «черного ящика» должно определять значение коэффициентов $\mathbf{w}_i$. На рис. 1 приведена обобщенная схема искусственной нейронной сети, осуществляющей элементарный акт прогнозирования вектора из двух скалярных сигналов.

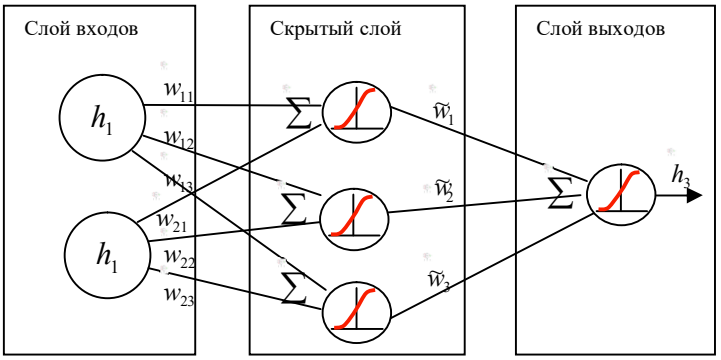


Рис. 1. Обобщенная схема искусственной нейронной сети, осуществляющей элементарный акт прогнозирования вектора из двух скалярных сигналов $\{h_i\}$

Нелинейность в прогнозировании с помощью искусственной нейронной сети обусловлена тем, что каждый узел сети в скрытом и выходном слоях представляет собой некоторую нелинейную функцию (рис. 1), так называемую сигмоидальную (монотонно растущую) функцию, например, логистическую функцию.

$$f(x) = \frac{M}{1 + \exp(-k(x - x_0))}\,, \tag{3}$$

где M, k, x_0 – некоторые скалярные параметры, определяемые масштабом изменчивости $\{h_i\}$ и эвристическими соображениями [5].

В результате в простейшем представлении временного хода уровня моря как одномерного скалярного колебательного процесса метод его прогноза с помощью искусственных нейронных можно представить в виде последовательности шагов, представленной на рис. 2.

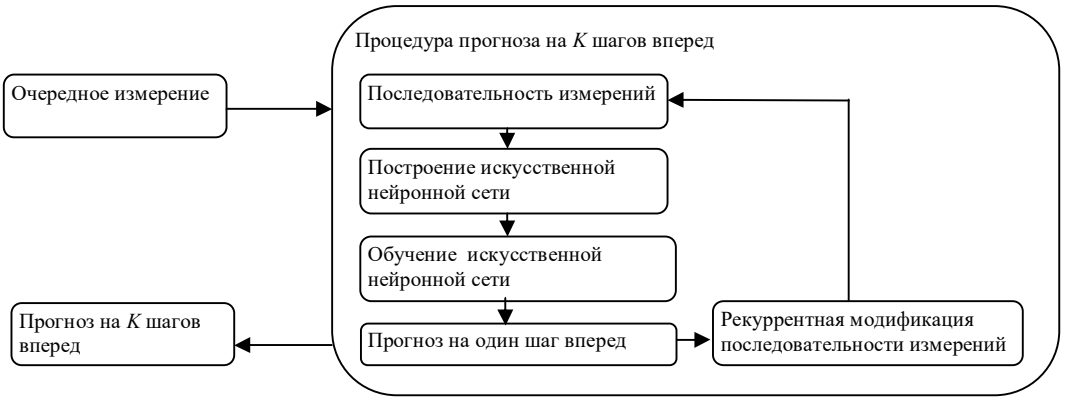


Рис. 2. Обобщенная блок-схема прогнозирования уровня моря как многомерного скалярного процесса (2)

Заметим, что искусственная нейронная сеть может представлять любую непрерывную нелинейную функцию. Это доказано в 1987 г. Р. Хехт-Нильсеном [6], который использовал теорему А.Н. Колмогора и В.В. Арнольда о представимости непрерывных функций нескольких переменных суперпозицией непрерывных функций одной переменной [7], доказанную в 1957 г. Работа Хехт-Нильсена конструктивна. Она позволяет находить необходимое количество слоев и узлов в нейтронной сети по заданным входам и виду сигмоидальной функций.

В настоящее время колебания уровня моря принято относить к более сложным системам хаотической нелинейной динамики [8]. Динамика таких систем кажется «случайной», даже если система уравнений, ее описывающая, является детерминированной, то есть системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Примерами подобных систем являются атмосфера, турбулентные потоки. Одним из источников разработки этой области исследований служила работа американского метеоролога Э. Лоренца, который создал упрощенную модель погоды, определяемую конспективной турбулентностью. Для таких систем характерно, существование так называемых «странных аттракторов» (притягивающех точек) – устойчивых областей в их фазовом пространстве, вокруг которых накручиваются фазовые траектории. Хаос, случайность в динамике системы вызывается экспоненциальной (сверхбыстрой) расходимостью траекторий в фазовом пространстве. Другими словами, незначительные начальные настояния между траекториями экспоненциально увеличиваются с течением времени. Кроме того, наличие нескольких странных аттракторов в фазовом пространстве системы приводит к «случайным перескокам» от одной притягивающей точки к другой в случайные моменты времени.

Методы хаотической нелинейной динамики широко применяются при исследованиях динамики уровня моря, например [9, 10]. В этом случае динамика

уровня моря представляется некоторой неизвестной системой обыкновенных дифференциальных уравнений, фазовое пространство которой имеет размерность, равную числу уравнений. При таком представлении стоит промежуточная задача восстановления многомерного фазового пространства системы по имеющимся дискретным измерениям уровня моря.

Принцип ее решения сводится к следующему. Положим, что измеренный временной ряд уровня моря $\{h_i\}$ является одномерной скалярной проекцией некоторой неизвестной динамической системы, имеющей многомерное фазовое пространство размерности $m \geq 2$. В этом пространстве последовательность $\{h_i\}$ представляется в виде последовательности векторов:

$$\{\mathbf{h}_k\} = \mathbf{h}_1, \ldots, \mathbf{h}_N, \tag{5}$$

где $\mathbf{h}_k = \left(h_k, h_{k-p}, h_{k-2p}, \ldots, h_{k-(m-2)p}\right)$,
$k = i + mp, \ldots, N$.

Здесь p – время запаздывания (delay-time), m – размерность фазового пространства (пространства вложения), p и m – натуральные числа, большие или равные единице. Значения p и m определяются по данным исходного ряда $\{h_i\}$.

Таким образом, колебаний уровня моря представляются как многомерный векторный процесс (5).

Существует несколько способов оценки p и m, например, методом запаздывания (delay-time reconstruction) [8]. В этой работе для оценки p и m будет использован метод прямого перебора всех пар значений p и m из некоторого их диапазона и выбора тех значений, которые приводят к минимуму ошибки прогноза на обучающем наборе измерений.

На рис. 3 представлена графическая схема представления наблюдений $\{h_i\}$ в виде нелинейной хаотической динамической системы.

Предположим, что значения p и m для выражения (5) известны, тогда исходная задача прогноза сводится к задаче прогнозирования последовательности векторов $\{\mathbf{h}_k\}$ из (5). Для этого применяется так называемый метод локального прогнозирования фазовых траекторий временных серий наблюдений (Local Time Series Prediction) [11, 12].

Особенность этого метода состоит в том, что они используются для прогнозирования состояний динамического процесса без явного определения аналитической модели самого процесса, т. е. без явного нахождения соответствующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Метод локального прогнозирования был предложен Э. Лоренцем еще в 1969 г.

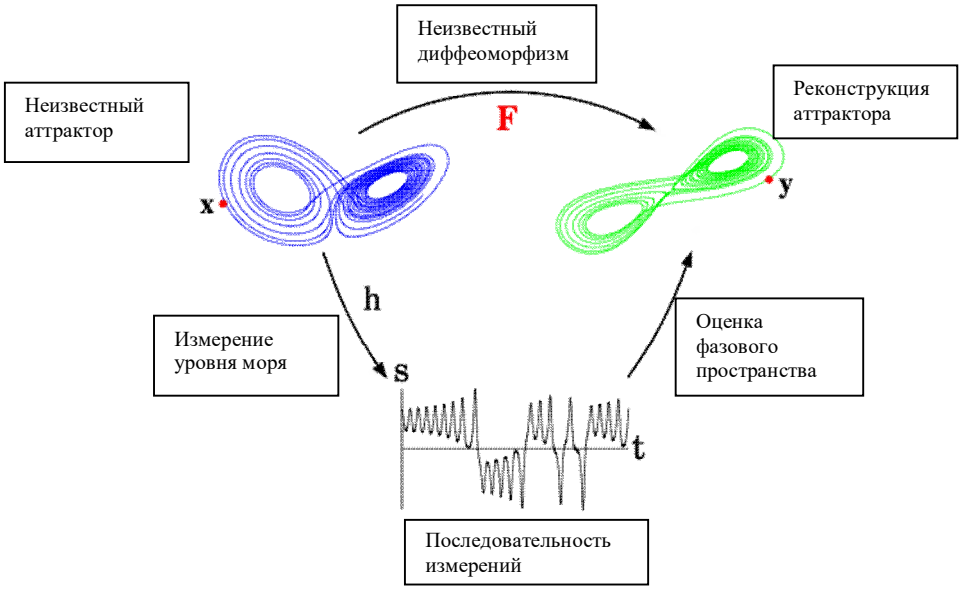


Рис. 3. Иллюстрация представления наблюдений $\{h_i\}$ в виде нелинейной хаотической динамической системы

В этом методе, если значение вектора $\mathbf{h}_k$ известно в "момент времени" k, то прогноз вектора $\mathbf{h}_{k+1}$ в "момент времени" $k+1$ задается как точка на траектории, аппроксимирующей ближайшие соседние траектории к $\mathbf{h}_k$ в фазовом пространстве (рис. 4). В работе [11] изложен метод, аппроксимирующий локальное отображение последовательных состояний с помощью полиномов высокого порядка, коэффициенты которых должны быть определены с помощью ближайших соседей и некоторой процедурой подбора.

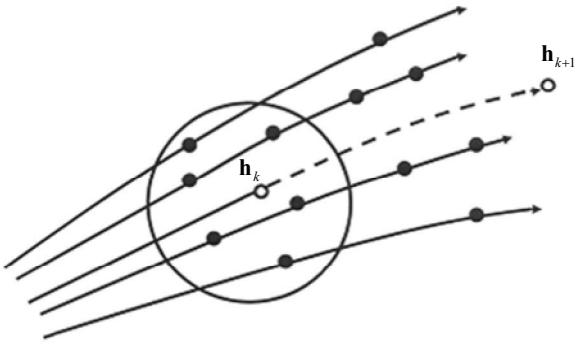


Рис. 4. Иллюстрация метода локального прогнозирования в фазовом пространстве процесса

Иначе говоря, связь между двумя состояниями $\mathbf{h}_k$ и $\mathbf{h}_{k+1}$ на аттракторе в фазовом пространстве вложения аппроксимируется нелинейным отображением F как

$$\mathbf{h}_{k+1} \approx F\left(\mathbf{h}_k\right). \tag{6}$$

Так как метод локального прогнозирования нелинейный, то нельзя для прогнозирования применять линейный метод ARIMA (ARFIMA) (5). Для этого следует применять нелинейные методы искусственных нейронных сетей.

Здесь задач (1) – (1') элементарного акта прогнозирования с учетом (5) записывается в виде:

$$\mathbf{h}_{k+1} = \mathbf{w}_1\mathbf{h}_1 + \ldots + \mathbf{w}_k\mathbf{h}_k\,, \tag{7}$$

а архитектура структуры прогноза уровня моря с использованием искусственных нейронных сетей представляется на рис. 5.

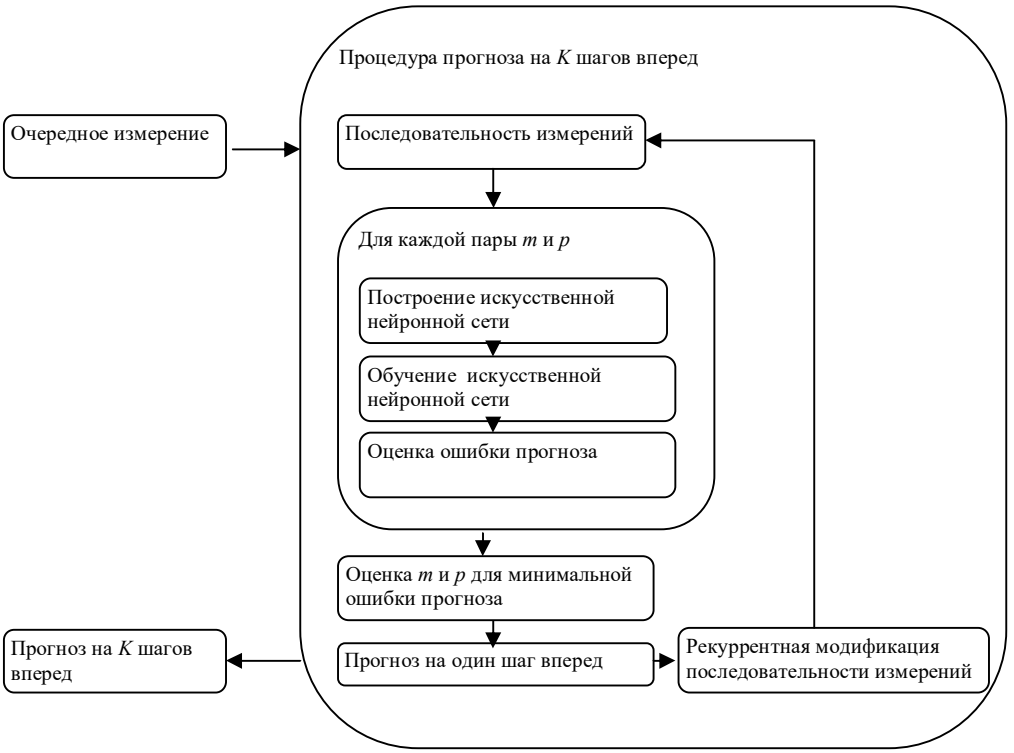


Рис. 5. Обобщенная блок-схема прогнозирования уровня моря как многомерного векторного процесса (5)

Авторами статьи осуществлена практическая реализация представленных на рис. 2 и 5 блок-схем прогнозирования в виде программного пакета для предвычисления уровня моря. Программный пакет предвычисления уровня моря реализован в виде одностраничного Web-приложения. Серверная сторона написана на языке программирования Julia с использование пакета R. Экранный интерфейс Web-приложения представлен на рис. 6. На момент написания статьи доступ в интернете к Web-приложению осуществляется по IP адресу 91.151.190.171:8153.

Web-приложение предназначено для предвычисления уровня моря либо для акваторий с незначительными приливами (где приливные колебания составляют менее 50 %), либо для акваторий в которых приливы велики, но интервал длительности измерений уровня моря недостаточен для вычисления гармонических постоянных. Исходными данными служат дискретные эквидистантные измерения уровня моря в фиксированной точке акватории на период времени от одних до десяти суток. Интервалы времени между измерениями не должны превышать двух часов.

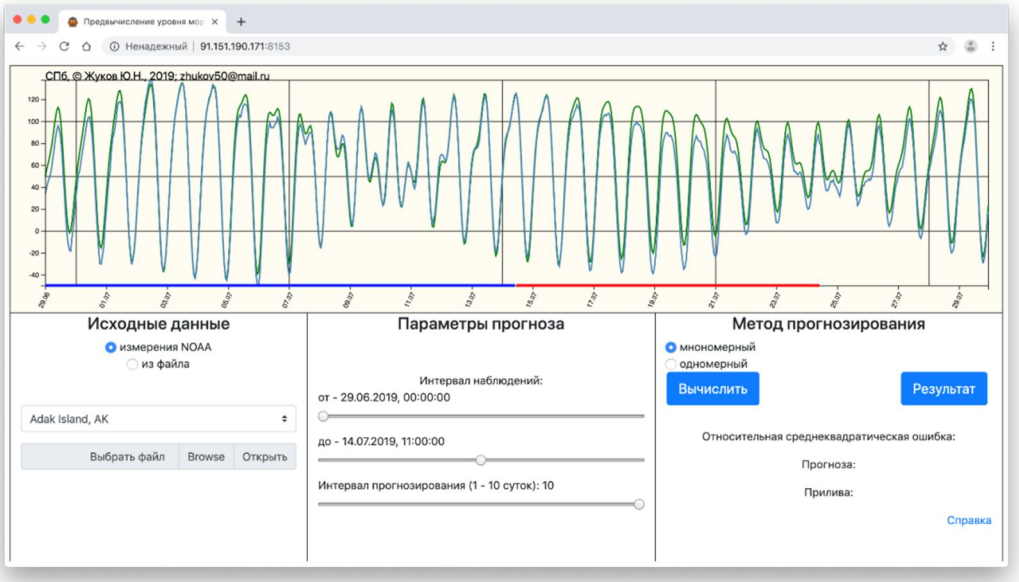


Рис. 6. Стартовое окно Web-приложения программного пакета предвычисления уровня моря в браузере Google Chrome

Основными элементами пользовательского интерфейса Web-приложения являются:

1. Отображение графиков представления измерений уровня моря и прогноза (в верхней части окна).
2. Задание исходных данных уровня моря (левая нижняя панель).
3. Выбор параметров прогноза уровня моря: интервала прогнозирования и интервала наблюдений (средняя нижняя панель).
4. Задания метода прогноза и вывода погрешности прогноза (правая нижняя панель), если интервалы наблюдений и прогноза пересекаются.

Ссылка на инструкцию пользователя (справка) расположена в правой нижней части окна Web-приложения.

Прогноз в Web-приложении осуществляется с помощью искусственных нейронных сетей двумя путями: либо с применением реконструкции многомерного фазового пространства (метод нелинейной динамики), либо без реконструкции (метод многомерной скалярной функции).

Исходными данными могут служить как измерения уровня моря на пяти станциях Северной Америки (источником служит сайт NOAA – см. таблицу), так и файлы с данными измерений пользователя.

Таблица

Станции Северной Америки, используемые в Web-приложении

Наименование станции	**Широта, северная, градусы**	**Долгота, западная, градусы**	**Доля прилива в колебании уровня моря**
Adak Island, AK	51.8633	176.6316	Средняя
Atka, AK	52.2316	174.1716	Средняя
Kodiak Island, AK	57.73	152.5133	Высокая
Nome, Norton Sound, AK	64.495	165.44	Низкая
Prudhoe Bay, AK	70.4116	148.5316	Низкая

Измерения с сайта NOAA используются в целях исследования качества методов прогноза для временных рядов уровня моря различной изменчивости и значимости приливной составляющей в них.

Для реконструкции фазового пространства используются значения параметров p и m в интервале значений $2,...,5$. Выбор оптимальных параметров p и m осуществляется нахождением таких значений p и m, при которых среднеквадратическая ошибка прогноза минимальна.

В качестве сигмоидальной функции используется стандартная логистическая функция (4).

Опытное использование Web-приложении показывает, что методы реконструкции многомерного фазового пространства (5) применимы, когда изменчивость уровня моря на интервале измерения и прогнозирования относятся к одному странному аттрактору. В противном случае, прямое прогнозирование многомерного скалярного ряда в виде (2) может быть более эффективным.

Таким образом, можно констатировать, что временную изменчивость уровня моря можно прогнозировать на срок до десяти суток с помощью искусственных нейронных сетей. Это целесообразно делать в двух случаях: когда приливы составляют незначительную долю в суммарных колебаниях уровня моря (до 50 %), или когда суммарные колебания уровня моря практически представляются приливными колебаниями, но длительность наблюдений не позволяет рассчитать гармонические постоянные (длительность наблюдений менее 15 суток).

В зависимости от конкретных свойств временной динамики уровня моря для его прогнозирования следует применять либо методы представления временного хода уровня моря в виде нелинейной хаотической динамической системы, либо использовать традиционное представление в виде скалярного временного ряда.

Применение методов прогнозирования суммарных колебаний уровня моря в виде Web-приложения позволяет обеспечить оперативность ГМО технологической деятельности в прибрежной зоне арктических морей России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков Ю. Н., Федорова Е. В. Метод оценки вероятности экстремального уровня моря по краткосрочным рядам наблюдений // Навигация и гидрография. –2018. – № 54. – С. 73–83.
2. Lagrange J. L. Recherches sur la maniere de former des tables des planetes d'apres les seules observations // Qeuvres VI, Paris, 1873. Pp. 507–627.
3. Серебренников М. Г., Первозванский А. А. Выявление скрытых периодичностей. – М.: Наука, 1965. – 244 с.
4. Теория систем. Математические методы и моделирование. Сборник статей. – М.: Мир, 1989. – 384 с.
5. Ясиницкий Л. Н. Интеллектуальные системы. – М.: Лаборатория знаний, 2016. – 221 с.
6. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem // IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks, San Diego, 1987. – Vol. 3. Pp. 11–13.
7. Арнольд В. И. О представлении функций нескольких переменных в виде суперпозиции функций меньшего числа переменных // Математическое просвещение. – 1958. – Вып. 3. – С. 41–61.
8. Шустер Г. Детерминированный хаос. – М.: Мир, 1988. – 253 с.
9. Khatibi R., Ghorbani M. A., Aalami M. T. Dynamics of hourly sea level at Hillarys Boat Harbour, Western Australia: a chaos theory perspective // Ocean Dynamics. Theoretical, Computational and Observational Oceanography. – 2011. – Vol. 61. – No 11. – Pp. 1797–1807.
10. Domenico M., Asadi H. Chaos and reproduction in sea level. // Applied Mathematical Modelling. – 2013. – No 37. – Pp. 3687–3697.
11. Farmer DJ, Sidorowich JJ Predicting chaotic time series. Phys Rev Lett, 1987, 59:845–848.
12. Engster D., Parlitz U. Local and Cluster Weighted Modeling for Time Series Prediction // Handbook of Time Series Analysis –Leipzig, WILEY-VCH, 2006. – Pp. 39–65.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR SEA LEVEL FORECASTING

Yu. N. Zhukov(«GNINGI» JSC), **E. V. Fedorova** (The State Oceanographic Institute)

The basic elements of sea level forecasting methods based on artificial neural networks are presented. Sea level variability is represented in two ways: by nonlinear chaotic dynamics with reconstruction of a multidimensional phase space and a multidimensional scalar function. The forecast is oriented for water area with insignificant tides based on short series of equidistant observations. The practical implementation of forecasting methods in the form of a one-page Web application is described.

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.58

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ

С. И. МАСТРЮКОВ
(АО «ГНИНГИ»)

В условиях изменения климата возрастает внимание к проблеме управления «климатическими и погодными рисками» и адаптации к этим изменениям. При исследованиях изменений климата в интересах ВМФ невозможно обойтись без применения современного методического аппарата оценки климатических рисков. В работе изложена современная концепция «климатических рисков», принятая Межправительственной группой экспертов по изменениям климата (МГЭИК) и обобщены современные подходы к оценке климатических рисков.

Значимость проблемы изменения климата. В Докладе Всемирного экономического форума (ВЭФ) 2017 года [1] среди глобальных рисков (экономических, геополитических, социальных, технологических и погодно-климатических), ранжированных по их вероятности, первое место заняли риски погодно-климатического характера. По масштабу оказываемого воздействия экстремальные погодные явления уступили лишь оружию массового поражения.

Под глобальным риском в Докладе ВЭФ понимается неопределенное событие или условие, которое, если оно произойдет, может оказать значительное негативное воздействие на несколько стран или отрасли в течение длительного периода времени (10 лет и более).

На рис. 1 приведён график общего числа природных катастроф за период 1980–2016 гг., содержащийся в годовом отчёте Мюнхенской страховой компании [2]. Общее число природных катастроф за последние 36 лет возросло почти в три раза. При этом за этот период отмечено сокращение числа человеческих жертв, вызванных природными катастрофами, с 60 тысяч человек ежегодно в 1990-х годах до 10 тысяч человек ежегодно в последние два года. При этом выплаты страховых компаний по природным катастрофам за рассматриваемый период возросли с 15 до 135 млрд. долларов в год. Общий экономический ущерб от природных катастроф в 2017 году составил 330 млрд долларов США.

В нашей стране по данным Росгидромета за период 1990–2000 гг. на территории России ежегодно фиксировалось 150–200 нанесших ущерб опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ). В последующие годы их число возросло до 250–300 в год, а начиная с 2007 года в среднем один раз в два года число таких ОЯ превышало 400. При этом ОЯ, наблюдаемые в течение двух последних десятилетий, оказались более интенсивными и разрушительными, чем когда-либо [3].

Рис. 1. Число природных катастроф за период 1980–2016 гг. по данным Мюнхенской страховой компании [2]

Рост экономического ущерба от природных факторов и осознание опасности климатических изменений стимулировали усиление прикладной направленности климатических исследований. Целями этих исследований было признано управление климатическими рисками и адаптация человеческой деятельности во всех её проявлениях к современному и будущему климату.

Для достижения намеченных целей на международном уровне был принят ряд новых инициатив, направленных на повышение прикладной направленности климатических исследований. Среди этих мер можно упомянуть:

– Глобальную рамочную основу для климатического обслуживания (ГРОКО) [4]. В реализации этой программы принимают участие 16 стран, общий бюджет проектов составляет 700 млн долларов США;

– Сендайскую (2015 г.) рамочную программу действий на 2015–2030 гг. по уменьшению опасности бедствий. В этой программе отмечено, что инвестировать в снижение рисков более эффективно, чем оплачивать последствия климатических катастроф [5];

– в рамках выполнения Всемирной климатической программы в ВМО создана целевая группа по управлению климатическими рисками Комиссии по климатологии ВМО, разработана и функционирует Глобальная программа исследований уязвимости, воздействий и адаптации к изменению климата (PROVIA) [6].

Перечисленные действия и ряд других мер международного сообщества нацелены на снижение отрицательных последствий изменения климата двумя возможными способами – путём управления климатическими рисками и путём адаптации человеческой деятельности к изменениям климата.

Осознание важности проблемы изменения климата для Российской Федерации привело к принятию в 2009 г. «Климатической доктрины Российской Федерации» [7].

Благодаря принятым мерам отечественные исследования климата перешли на новый уровень, возросла их прикладная направленность.

В 2008 г. Росгидрометом был опубликован первый, а в 2014 г. – второй «Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации». В 2017 г. опубликован «Доклад Росгидромета о климатических рисках на территории Российской Федерации» [8].

В Росгидромете и в МЧС РФ активно развивается методический аппарат оценки погодно-климатических рисков, разработки систем управления рисками и адаптации к последствиям климатических изменений. К сожалению, в ВМФ подобные исследования не ведутся, что и стало стимулом для написания настоящей статьи.

Классификация рисков. Согласно А. И. Орлову [9] риски по масштабу воздействия делят на шесть крупных групп:

– планетарные (в масштабе всей Земли);
– глобальные (в масштабе одного или нескольких государств);
– финансовые;
– коммерческие;
– производственные;
– личные.

В состав пречисленных групп входит примерно сто видов риска. Риски возникновения природных стихийных бедствий (землетрясений, извержений вулканов, цунами, ураганов, наводнений, засух), космических катастроф (столкновения с астероидами, сменой магнитных полюсов), а также климатические риски (потепление, похолодание, подъем уровня Мирового океана и т. п.) отнесены к рискам планетарного и/или глобального масштаба. Погодные и экологические риски отнесены к рискам финансового, коммерческого, производственного и личного характера.

В современных документах по проблемам изменения климата часто используется термин *«климатические риски».*

Этот термин был введён МГЭИК в 2012 г. в «Специальном докладе по управлению рисками экстремальных явлений и бедствий для содействия адаптации к изменению климата» (СДЭБ) [10]. Климатический риск был определён как вероятность возникновения неблагоприятных событий для уязвимых и подверженных рискам реципиентов в результате опасных погодно-климатических явлений, т. е. под климатическими рисками в настоящее время понимают качественную характеристику возможности наступления нежелательных последствий для реципиентов с разной степенью уязвимости и подверженности влиянию погодно-климатических явлений в условиях неопределённости будущего состояния климатической системы. Концепцию климатических рисков МГЭИК иллюстрирует рис. 2.

Представляется, что основным недостатком является качественный характер определения МГЭИК и отсутствие в нем допустимого размера последствий для реципиентов от климатических изменений. Кроме того, явно не определено, как при оценке климатических рисков учитывать неопределённость прогноза климатических изменений.

Рис. 2. Концепция «погодно-климатических рисков» МГЭИК [10]

Под термином *реципиент* понимается объект (система объектов), подверженных воздействию природной среды. В качестве реципиентов рассматриваются объекты экономики в масштабах страны, ведомства, корпорации, региона, а также отдельные конкретные объекты. Во всех случаях реципиент характеризуется некоторой площадью территории и долей внутреннего валового продукта (ВВП) или иными показателями производства.

Под *подверженностью* климатическим рискам понимается степень открытости воздействию, определяемая спецификой работы реципиента.

Под *уязвимостью* понимают склонность к неблагоприятному воздействию. Понятие уязвимости охватывает самые разнообразные концепции, включая чувствительность или восприимчивость к ущербу и отсутствие способности справляться с этой проблемой и адаптироваться. Уязвимость выражается в числе погибших людей, количестве разрушений, нарушения инфраструктуры, в виде ущерба, определенного в денежных, энергетических единицах, урожайности, в долях внутреннего валового продукта (ВВП) или иных показателях ущерба [8].

К сожалению, термин «климатическая уязвимость» также трактуется по-разному. Например, в работе [11] использован безразмерный показатель, представляющий собой сумму отношений абсолютного экстремума к среднегодовому экстремуму нескольких климатических факторов. В качестве основных климатических факторов использованы температура воздуха (минимальная и максимальная), количество осадков и скорость ветра. Понятно, что такого рода безразмерный показатель отражает степень изменчивости или «континентальности» климата и не позволяет перейти к последующей оценке погодно-климатических рисков. Более продуктивным представляется подход к количественной оценке уязвимости, предложенный сотрудниками ГГО им. А. И. Воейкова, который будет описан ниже.

Методы расчёта показателей «погодно-климатических рисков»

Прикладные климатические исследования предполагают переход от качественных оценок климатических рисков к количественным.

С математической точки зрения риск чаще всего рассматривается как функция двух переменных – частоты и последствий нежелательного события [12]:

$$R = f(p, C),$$

где R – риск; p – вероятность ОЯ; C – последствия ОЯ (уязвимость).

Во многих случаях риск отождествляется с количественной мерой возможного ущерба и выражается в виде произведения вероятности ОЯ p и уязвимости реципиента C [12].

$$R = p \cdot C\,. \tag{1}$$

Если сравнить выражение (1) с определением МГЭИК для климатических рисков, то можно утверждать, что уязвимость и подверженность климатическим рискам можно трактовать как ущерб от того или иного опасного явления.

Н. В. Кобышевой и др. разработана методика оценки экономического риска опасных погодно-климатических явлений [13, 14]. Для этого был использован оригинальный подход, основанный на косвенной оценке экономического риска, поскольку непосредственный расчет экономического риска вызывает ряд затруднений. Расчёт экономического риска базируется на числе пострадавших от ОЯ на территории реципиента жителей и допущении, что в результате этого пострадавшие не внесли свой вклад в ВВП страны, что и является экономическим ущербом (риском). Несмотря на спорность этого допущения, предложенный ими аппарат можно использовать в качестве основы для количественной оценки климатических рисков и для военно-морской деятельности. Продукция, создаваемая жителями, попавшими в зону действия ОЯ, как бы затрачивается на компенсацию ущерба, создаваемого ОЯ. Поэтому сначала рассчитывается социальный риск.

Социальный риск R_{soc} или число пострадавших людей оценивается как произведение уязвимости (числа людей, подвергшихся воздействию источника опасности) на вероятность ОЯ.

Уязвимость реципиента в простейшем случае при равномерном распределении жителей численностью l зависит от отношения площади, занятой ОЯ, s ко всей площади реципиента S:

$$C = l\frac{s}{S}.$$

При отсутствии сведений о площади, занятой ОЯ, s, за величину s принимается радиус горизонтальной корреляции ОЯ.

С учётом этого выражение (1) приобретает вид:

$$R_{soc} = p \cdot l\frac{s}{S} \cdot k\,,$$

где k – коэффициент агрессивности опасного явления.

В данном случае социальный риск можно трактовать как число людей, подверженных опасным природным явлениям в среднем один раз в год.

Коэффициент агрессивности ОЯ k зависит от ряда факторов. При его определении невозможно избежать упрощения и субъективности. В работе [14] при оценке коэффициента агрессивности природных явлений за 1 принимается воздействие сильного ветра (15 м/с), а воздействие других ОЯ оценивалось пропорционально величине ветрового напора, то есть пропорционально квадрату скорости ветра. Например, коэффициент агрессивности сильного ветра принят равным 1, а смерча – 6.

Совокупный ущерб называют экономическим риском (R_{ekon}). Для его расчёта в работе [15] предложено использовать выражение:

$$R_{ekon} = A \cdot t \cdot R_{soc} ,$$

где A – коэффициент, называемый ценой риска и полагаемый равным доле ВВП России, приходящейся на одного жителя России; t – средняя продолжительность ОЯ, приводящего к потерям ВВП.

В ГГО им. А. И. Воейкова разработан упрощённый подход к количественной оценке климатических рисков, позволяющий учесть пространственно-временной масштаб опасных метеорологических явлений, агрессивность их воздействия и уязвимость реципиентов.

Оценка допустимости риска. Впервые концепция приемлемого (допустимого) риска была разработана в Нидерландах в 1989 г. и теперь применяется в практической деятельности ряда государств [8]. Согласно этой концепции весь «спектр» значений риска (рис. 3) разбивают на три области:

– недопустимого (чрезмерного) риска;
– приемлемого риска;
– пренебрежимого риска.

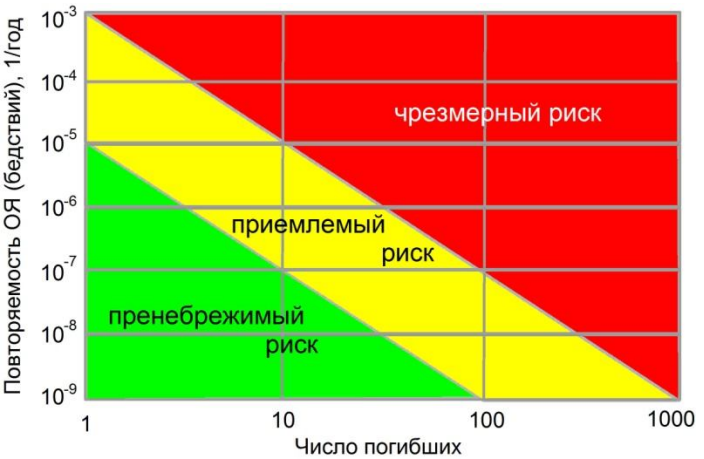


Рис. 3. Оценка допустимости риска [8]

Концепция допустимости риска является ключевой и в отечественных системах управления рисками. При этом целевая группа по управлению климатическими рисками Комиссии по климатологии ВМО определила понятие «управление рисками» как системный процесс, в котором климатическая информация используется для снижения погодно-климатических рисков для повышения устойчивости социальных, экономических и экологических систем [8].

Анализ и прогноз изменений климата, оценка климатических рисков предваряют последующие этапы борьбы с нежелательными последствиями климатических изменений. Рассмотрение современных подходов к созданию систем управления климатическими рисками, к разработке адаптационных мер и мер по борьбе с причинами изменения климата выходит за рамки настоящей работы.

Таким образом, в настоящее время прикладная климатология переживает новый этап своего развития. Несмотря на значительный прогресс, считать, что задача разработки методологии климатических исследований в условиях меняющегося климата завершена, было бы неверно.

Рано или поздно проблема необходимости оценки климатических рисков и выработки предложений по адаптации военно-морской деятельности к климатическим изменениям будет осознана и в ВМФ России, так же, как это было осознано руководством ВМС США [16]. В этом случае потребуется разработать соответствующую методологию прикладных климатических исследований. Для этого можно будет использовать современные методические подходы, частично рассмотренные в настоящей работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт «World Economic forum». URL: http://reports.weforum.org/global-risks-2017/appendices/appendix-a-description-of-global-risks-trends-and-emerging-technologies-2017/.
2. Сайт страховой компании Munich RE. URL: https://www.munichre.com/.
3. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. – СПб, 2017. – 106 с. URL: http://relay.voeikovmgo.ru/images/ dokumenty/ 2017/riski.pdf.
4. Глобальная рамочная основа для климатического обслуживания // Бюллетень ВМО . – 2012. – Т. 61(2). – С. 4–9.
5. Сайт United Nations office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). URL: https:// www.unisdr.org/files/43291_russiansendaiframeworkfordisasterri.pdf.
6. Сайт ВМО. URL: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ index en.html.
7. Распоряжение Президента РФ от 17.12.2009 N 861-рп «О Климатической доктрине Российской Федерации». URL: http://www.consultant.ru/document/cons doc LAW 94992/.
8. Доклад Росгидромета о климатических рисках на территории Российской Федерации // Сайт Климатического центра Росгидромета. URL: http://relay.voeikovmgo.ru/ru/.
9. Орлов А. И. Эконометрика. – М.: Экзамен, 2004. – 576 с.,
10. Орлов А. И., Пугач О. В. Подходы к общей теории риска // Управление большими системами. – 2012. – № 40. С. 49–82.
11. IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor and P. M. Midgley (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. – 582 p.
12. Оганесян В. В. Методика расчёта климатической уязвимости территории на основе безразмерных климатических индексов // Труды Гидрометцентра России. – 2017. – Вып. 366. – С. 158–165.
13. Быков А. А., Акимов В. А., Фалеев М. И. Нормативно-экономические модели управления риском // Деловой экспресс. – 2004. – Т. 1. – № 2,. – С. 125–137.

14. Кобышева Н. В. Методика экономического обоснования адаптационных мероприятий, связанных с изменением и изменчивостью климата // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. – 2014. – Т. 574. – С. 5–39.
15. Кобышева Н. В., Галюк Л. П., Панфутова Ю. А. Методика расчёта социального и экономического рисков, создаваемых опасными явлениями погоды // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. – 2008. – Т. 558. – С. 162–172.
16. Мастрюков С. И. Червякова Н. В. Краткий обзор исследований в области изменений климата и оценки их влияния на военно-морскую деятельность // Навигация и гидрография. – 2014. – № 37. – С. 81–92.

MODERN APPROACHES TO CLIMATE RISKS ESTIMATION

S. I. Mastryukov («GNINGI» JSC)

In the context of climate change, increasing attention is paid to the problem of managing "climate and weather risks" and adaptation to climate change. When studying climate change in the interests of the Navy, it is impossible to do without using the modern methodological apparatus of estimation climate risks. The paper presents the modern concept of "climate risks" adopted by the intergovernmental panel on climate change (IPCC) and summarizes modern approaches to climate risks estimation.

УДК 551.58

ОЦЕНКА ПОВТОРЯЕМОСТИ НЕКОТОРЫХ РАДИОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, СПОСОБСТВУЮЩИХ ЗАГОРИЗОНТНОМУ РАСПРОСТРАНЕНИЮ РАДИОВОЛН НАД МОРЕМ У ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ

С. И. МАСТРЮКОВ
(АО «ГНИНГИ»)

В условиях повышения требований к качеству информационной поддержки морской деятельности возросло внимание к оценке природных условий, влияющих на распространение радиоволн над морской поверхностью. Всё более актуальным становится умение прогнозировать условия распространения радиоволн для целей заблаговременного планирования применения корабельных радиотехнических средств. В статье рассмотрена возможность оценки повторяемости радиометеорологических явлений, способствующих загоризонтному распространению радиоволн на основе обработки международного массива исторических данных аэрологического зондирования.

Значимость проблемы. При эксплуатации радиолокационных средств (РЛС) сантиметрового диапазона было установлено, что в некоторых случаях эти средства обнаруживают цели, скрытые кривизной Земли и находящиеся на дистанциях, в несколько раз превышающих обычную дальность обнаружения РЛС. Использование явления сверхдальнего распространения радиоволн над морской поверхностью позволяет существенно повысить эффективность применения корабельных систем

радиолокационного обнаружения и радиотехнических средств обеспечения навигационной безопасности мореплавания.

Общие сведения о влиянии гидрометеорологических условий на распространение радиоволн

Изучение влияния атмосферы на распространение радиоволн началось с открытием радио А. С. Поповым, который и использовал радио в качестве грозоотметчика. Во время Второй Мировой войны бурно развилась радиолокация, были освоены диапазоны дециметровых, сантиметровых, а потом и миллиметровых волн. Потом, уже в 1950–1960-е годы было теоретически и экспериментально исследовано дальнее распространение радиоволн за счет рефракции в тропосфере [1, 2]. Позже было исследовано дальнее распространение радиоволн за счёт рассеяния и отражения на тропосферных неоднородностях. Были получены радиолокационные отражения от облаков, зон осадков, гидрометеоров и даже от «ясного неба». Изучение процессов отражения, рассеяния и дифракции, и отражения радиоволн от гидрометеоров, турбулентных неоднородностей тропосферы, а также построение моделей этих процессов не закончено [3].

Существуют формальные критерии идентификации сверхдальнего распространения радиоволн за счёт сверхрефракции. Общепринятых критериев сверхдальнего распространения за счёт других процессов, влияющих на распространение радиоволн, в рамках настоящей работы не найдено. Вместе с тем, например, в работе [4] (стр.8) указано: «Наиболее благоприятными условиями для возникновения сверхрефракции являются: инверсия температуры (уменьшение температуры в направлении к земной и водной поверхности)».

Исходя из изложенного, для оценки вероятности сверхдальнего распространения звука над морской поверхностью у восточного побережья Камчатки в качестве критериев этого явления принято наличие:

– инверсии вертикального профиля индекса преломления, приводящая к явлению сверх рефракции;
– температурной инверсии в приземном слое тропосферы.

Подчеркнём, что второй критерий – наличие температурной инверсии не является общепринятым.

Описание использованных исходных данных

В качестве исходных данных использована База данных аэрологического зондирования IGRA НЦКД НОАА США (Integrated Global Radiosonde Archive V2 Dataset. Version 2.0)

Разработчик – Национальный центр климатических данных США (National Climatic data center – NCDC NOAA).

Период обобщения. Собраны данные по всему земному шару на аэрологических станциях, кораблях и дрейфующих станциях. Наиболее ранние наблюдения выполнены в 1905г. на одной станции. Всего собраны данные на 1158 станциям с разной продолжительностью наблюдений.

Краткое описание. IGRA – это коллекция исторических аэрологических наблюдений, выполненных с помощью радиозондов со всего мира. Архив состоит из двух основных частей: данные зондирования на отдельных станциях с оценкой их качества, средние месячные данные.

Все эти базы регулярно обновляются и предоставляются в формате ASCII. Данные зондирования IGRA, производные параметры, средние месячные значения и

информация об истории станции доступны по адресу ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/igra.

Формат данных. Данные представлены в виде текстовых файлов на отдельных аэрологических станциях. Формат данных непосредственных наблюдений (как правило, по двум синоптическим срокам) доступен по адресу ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/igra.

Описание созданной базы данных. Для выполнения анализа и оценки условий распространения радиоволн у восточного побережья Камчатки на основе описанного архива данных создана база показателей аэрологического режима и условий распространения радиоволн. За начало измерений на всех станциях принят 1980 год.

Краткая характеристика отдельных аэрологических станций, включённых в базу, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика аэрологических станций

Название	Код	Широта, °	Долгота, °	Высота, м	Начало	Окончание
KLJUCHI	32389	56,3167	160,8333	28	1980	2019
KORF	25954	60,35	166	4	1980	2006
M. VASILYEV	32217	50,017	155,4	25	1980	1994
PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKIJ	32540	53,0833	158,5833	78	1980	2019
OSTROV BERINGA	32618	55,2	165,9833	16	1980	2019

Особенности стандартных аэрологических измерений

Измерительная аппаратура радиозонда состоит из датчиков давления, температуры и влажности, а результаты измерений передаются в наземный комплекс по радиоканалу. В ряде работ подчёркивается, что косвенный расчёт вертикального профиля коэффициента преломления радиоволн по данным стандартных аэрологических измерений не вполне корректен. Основной причиной этого считается высокая скорость подъёма радиозонда и инерционность датчиков, что приводит к получению сглаженных профилей вертикального распределения метеоэлементов и к получению искаженных данных о высотном распределении коэффициента преломления. При использовании данных береговых аэрологических станций при оценке условий распространения радиоволн над морем наиболее представительны данные на островных станциях и для направлений ветра с моря на сушу. Эти обстоятельства целесообразно учитывать при обработке данных аэрологических измерений.

Важно подчеркнуть, что прямые измерения коэффициента преломления с помощью рефрактометров на тех же радиозондах не решает проблемы инерционности приборов. Имеется опыт использования авиации (самолётов и вертолётов) для измерений коэффициента преломления. Однако в этом случае нарушение естественной структуры метеорологических полей выше, чем при использовании радиозондов, что также снижает достоверность данных. Наиболее перспективными носителями измерительной аппаратуры следует признать малогабаритные беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Однако

наиболее показательным является непосредственная оценка дальности радиолокационной наблюдаемости.

Основным преимуществом стандартных аэрологических измерений является наличие данных продолжительных исторических наблюдений по всему земному шару. Именно это обстоятельство привело к появлению радиоклиматических атласов ещё в середине прошлого века [5]. Такого рода атласы продолжают издаваться, чаще всего в них приводятся средние профили индекса преломления, по которым невозможно оценить повторяемость явления сверхрефракции.

Наиболее достоверным представляется оценка повторяемости сверхдальнего распространения радиоволн непосредственно с помощью РЛС.

Некоторые результаты прямых оценок радиолокационной наблюдаемости в северо-западной части Тихого океана и их сопоставления с результатами косвенных оценок.

В работе [6] изложены результаты экспериментальных исследований радиолокационной наблюдаемости объектов в отдельных районах Охотского и Японского морей. В ходе исследований в июне-октябре 1989 г. использовались навигационные РЛС. Всего было сопровождено около 6 000 судов. Уровни отраженного сигнала определялись от судов с известной эффективной площадью рассеяния (ЭПР) и от случайных целей. Параллельно выполнялись метеорологические исследования, которые заключались в проведении судовых аэрологических измерений и расчете высоты волноводов испарения.

В ходе исследований выявлено, что в начале лета вероятность загоризонтного распространения дальностью 2 радиогоризонта была очень мала. Однако в августе вероятность загоризонтного распространения радиоволн, величиной 2 радиогоризонта и более возросла примерно до 50 %,

Полученные результаты сравнивались с результатами анализа параметров инверсионных слоев по данным аэрологического зондирования на станциях Южно-Сахалинск, Поронайск, Южно-Курильск, Уруп и Северо-Курильск. В цитируемой работе отмечено, что выполненный анализ данных аэрологического зондирования показал практически полное отсутствие инверсионных слоев с градиентами показателя преломления, характерными для сверхрефракции.

В настоящей работе сделана попытка оценить повторяемость инверсий, не только вертикального профиля коэффициента преломления, но и вероятность температурных инверсий у восточного побережья Камчатки.

Оценка репрезентативности данных радиозондирования

Для оценки режима инверсий и дальнего распространения радиоволн в приземном (приводном) слое принципиальное значение имеет степень вертикального разрешения данных аэрологического зондирования в нижнем слое тропосферы. Она определяется наличием наблюдений у поверхности Земли и общим числом измерений в приземном слое тропосферы.

Формат данных IGRA наряду с представлением сведений о давлении на изобарической поверхности предусматривает возможность идентификации данных наблюдений у поверхности Земли. На рис. 1 приведены графики многолетнего хода числа измерений у поверхности.

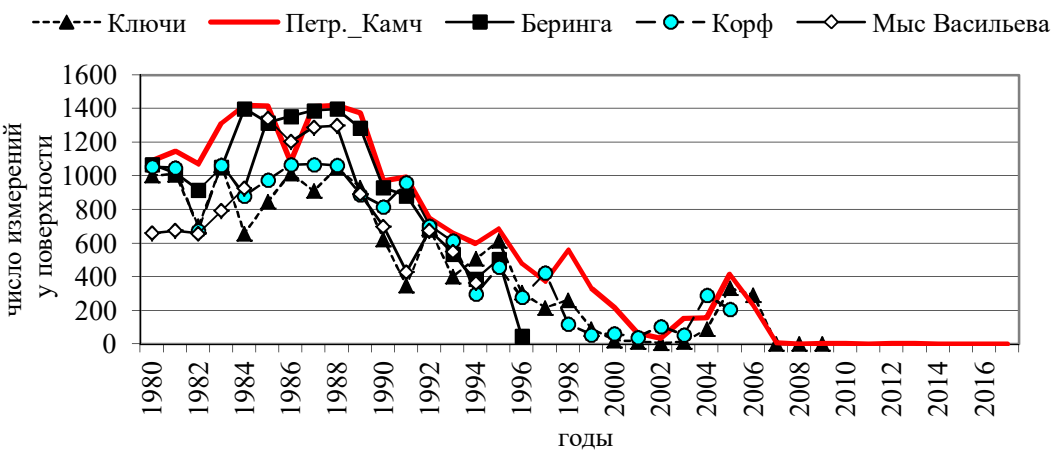


Рис. 1. Число измерений у поверхности Земли

Наибольшая продолжительность измерений отмечена на станциях Ключи и Петропавловск-Камчатский. Однако на этих и других станциях в районе восточного побережья Камчатки число измерений у поверхности Земли после 1998 г. резко сократилось, а после 2007 года данные у поверхности Земли практически перестали поступать. В то же время измерения на стандартных изобарических поверхностях, в частности на поверхности 1000 мб, продолжали поступать и после 2007 года, о чём свидетельствует график числа измерений на станциях Ключи и Петропавловск-Камчатский, представленный на рис. 2.

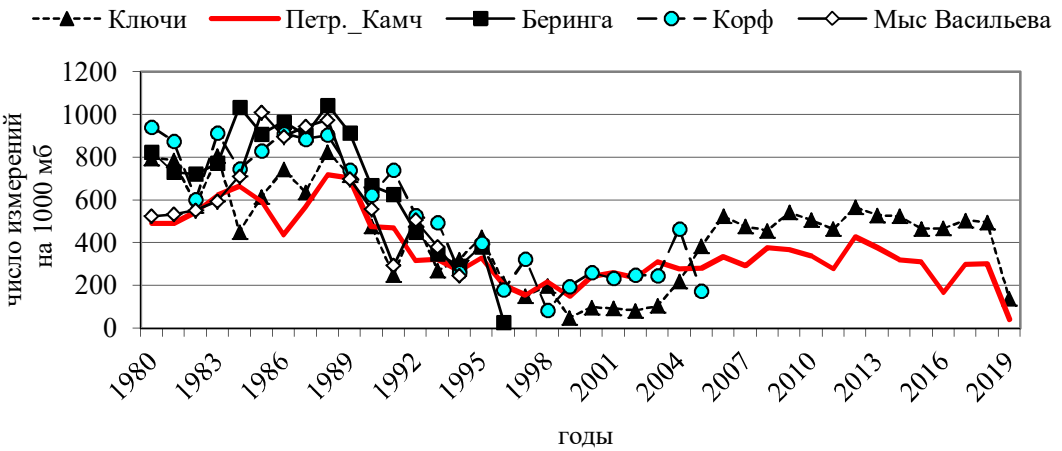


Рис. 2. Число измерений на высоте 1000 мб поверхности

С 1999 г. на отечественных аэрологических станциях в массиве данных IGRA в нижней тропосфере представлены данные только у поверхности Земли и на стандартных изобарических поверхностях 1000, 925, 850, 700 мб, а с июня 2000 года – только на перечисленных стандартных поверхностях, что практически исключает адекватную оценку вертикальной стратификации атмосферы в приземном

слое. Наиболее многочисленны данные наблюдений на станции Петропавловск-Камчатский.

Таким образом, выявлено, что для оценки вертикальной стратификации атмосферы на выбранных аэрологических станциях в приземном слое тропосферы наиболее представительны данные наблюдений 1980–1998 гг.

Методическая основа расчёта характеристик инверсии вертикального распределения температуры воздуха

В стандартной атмосфере температура воздуха с высотой падает со скоростью 0,65 °С на 100 м. Слои, в которых наблюдается рост температуры с высотой, называют инверсиями. Под приземной инверсией понимается приземный слой атмосферы, в котором температура растёт или не изменяется с высотой. Инверсии препятствуют вертикальным перемещениям воздуха и способствуют образованию тумана, дымки, мглы, смога. Инверсии представляют опасность для авиации, поскольку при наборе высоты и попадании в слой с тёплым воздухом снижается тяга двигателей. Представляет интерес оценка их связи с условиями, при которых отмечается сверхрефракция.

Ещё раз подчеркнём, что в работе [6] однозначно указано, что благоприятными условиями для возникновения сверхрефракции является инверсия температуры (уменьшение температуры в направлении к земной и водной поверхности). То есть речь идёт о классической температурной инверсии.

Если в слое от поверхности земли до следующего горизонта отмечается рост температуры, то такой слой при обработке данных считался инверсией температуры. Если рост температуры сохраняется и в вышележащих слоях, то мощностью инверсии считается разность между высотой максимума температуры и высотой поверхности земли над уровнем моря.

Методическая основа расчёта характеристик инверсии вертикального распределения показателя преломления

При распространении радиоволн в атмосфере проявляется эффект преломления. Плавное отклонение луча от прямолинейного пути его распространения называется рефракцией. Радиоволны, проникая в более плотные слои, уменьшают свою скорость и, наоборот, выходя из плотных слоев, увеличивают ее. В результате радиолуч отклоняется от прямолинейного участка либо выпуклостью вверх, огибая землю, либо выпуклостью вниз, удаляясь от земной поверхности. Дальность действия РЛС при этом, соответственно, либо возрастает, либо уменьшается. Особый интерес представляет явление критической рефракции или сверхрефракции, когда кривизна луча равна или больше кривизны земного шара. При таком распространении радиоволн дальность их действия превосходит во много раз дальность прямой видимости. В технике этот случай распространения радиоволн называют волноводным.

Основной характеристикой, определяющей особенности распространения ультракоротких волн, является коэффициент преломления воздуха n. Коэффициент преломления отличается от единицы на десятитысячные доли. Поэтому на практике используют индекс преломления N. Соотношение между N и n имеет вид:

$$N = (n - 1)10^6. \quad (1)$$

Коэффициент преломления зависит от температуры, давления и влажности воздуха. Известно, что вертикальные градиенты метеовеличин в среднем значительно превосходят горизонтальные. Поэтому в теории рефракции наибольшее распространение получила сферически-слоистая модель атмосферы.

Наиболее широко используется метод определения показателя преломления путем измерения температуры, давления и влажности воздуха с последующим расчетом N. Наиболее распространенная зависимость N (модуль коэффициента преломления) от метеовеличин имеет вид:

$$N = \frac{77{,}6}{T}\left(P + \frac{4810e}{T}\right), \qquad (2)$$

где P – атмосферное давление, гПа; T – температура, °K; e – парциальное давление водяного пара, гПа.

В среднем значение индекса преломления N с высотой изменяется линейно и в умеренных широтах составляет:

$$\frac{dN}{dh} = -40\ldots1/\text{км или } \frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{dh}} = -4*10^{-5}\ldots1/\text{км}.$$

Условия, при которых индекс преломления меняется таким образом, соответствуют так называемой нормальной тропосфере. В реальных условиях зависимость $N(h)$ существенно сложнее. Например, явление сверхрефракции происходит при соблюдении условия:

$$\frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{dh}} \le -\frac{1}{R_0} \le -\frac{1}{6371} \le -15.696*10^{-5}\ldots.\rho \le R_0,$$

где R_0 – радиус Земли.

В этом случае наступает полное внутреннее отражение (ПВО) волны в толще тропосферы, и луч возвращается к поверхности (рис. 3 *г*), волна может распространяться путём отражений от тропосферы и Земли на большие расстояния.

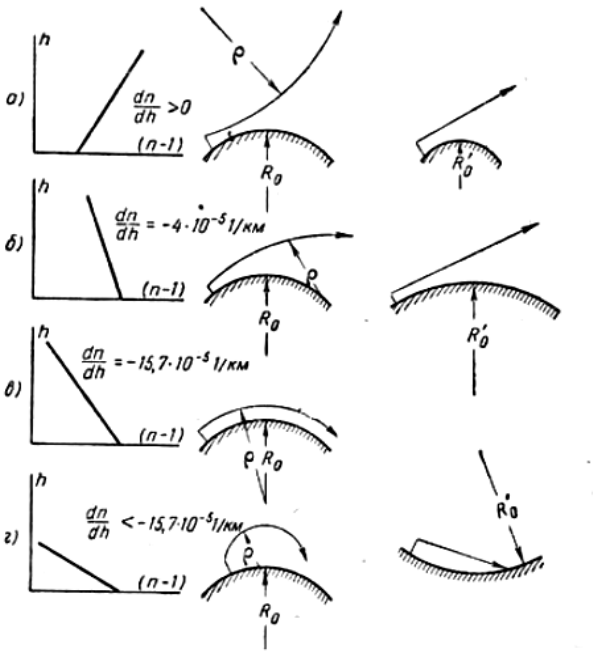


Рис. 3. Различные виды атмосферной рефракции: *а* – отрицательная рефракция; *б* – нормальная рефракция; *в* – критическая рефракция; *г* – сверхрефракция

Для расчёта давления водяного пара *е* в формуле (1) использованы рекомендации Международного телекоммуникационного союза [7].

Оценка повторяемости температурных инверсий в приземном слое тропосферы.

Ниже приведены результаты оценки повторяемости инверсий в приземном слое атмосферы на станции о. Беринга, расположенной на берегу океана, на станции Петропавловск-Камчатский, расположенной примерно в 10 км от Авачинского залива, и на станции Ключи, расположенной на удалении около 100 км от Камчатского залива Тихого океана. На рис. 4 приведён график сезонного хода повторяемости приземных температурных инверсий.

Режим приземных инверсий температуры воздуха в рассматриваемом районе определяется радиационными и адвективными факторами, а также состоянием подстилающей поверхности. Так, летом ночное выхолаживание воздуха, адвекция теплого воздуха в ночные часы с моря и адвекция холодного морского воздуха днём способствуют формированию приземных инверсий.

На всех станциях повторяемость температурных инверсий зимой выше, чем летом. По мере удаления от моря повторяемость приземных инверсий растёт. Наибольшая повторяемость приземных инверсий зимой отмечается на станции Ключи, наиболее удалённой от моря. Это объясняется двумя факторами – большей ролью ночного выхолаживания у поверхности суши по сравнению с выхолаживанием у поверхности моря за счёт влияния радиационных факторов и относительно небольшой скорости ветра. Повторяемость приземных инверсий на станции Ключи зимой достигает 70 %, а летом уменьшается до 25–30 %.

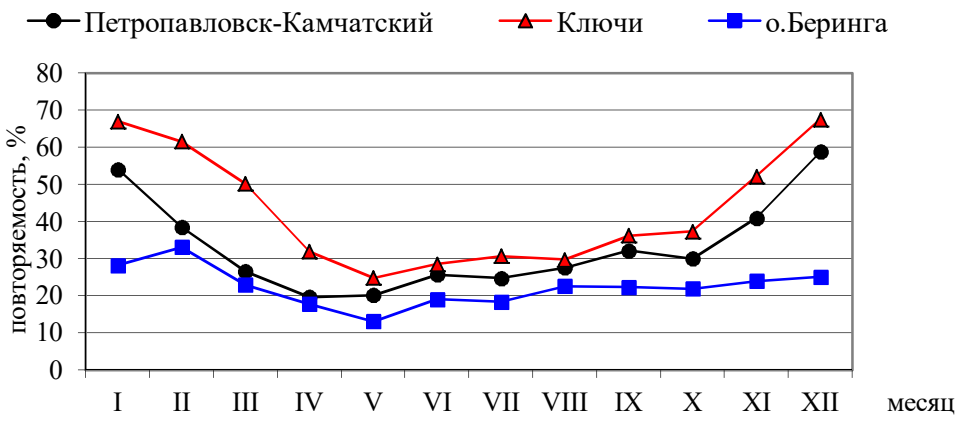


Рис. 4. Повторяемость инверсий температуры в приземном слое (объяснения в тексте)

На побережье, особенно на станции о. Беринга повторяемость температурных инверсий зимой заметно ниже, чем в континентальных районах. Летом повторяемость инверсий на о. Беринга составляет около 20 %, а зимой увеличивается лишь на 10 %.

Повторяемость инверсий существенно зависит от времени суток. На рис. 5 приведен годовой ход повторяемости приземной инверсии в Петропавловске-Камчатском в полночь (12 ч UTC) и полдень (0 ч UTC). В зимний период повторяемость инверсий мало зависит от времени суток. В летний период инверсии значительно чаще отмечаются в ночные часы.

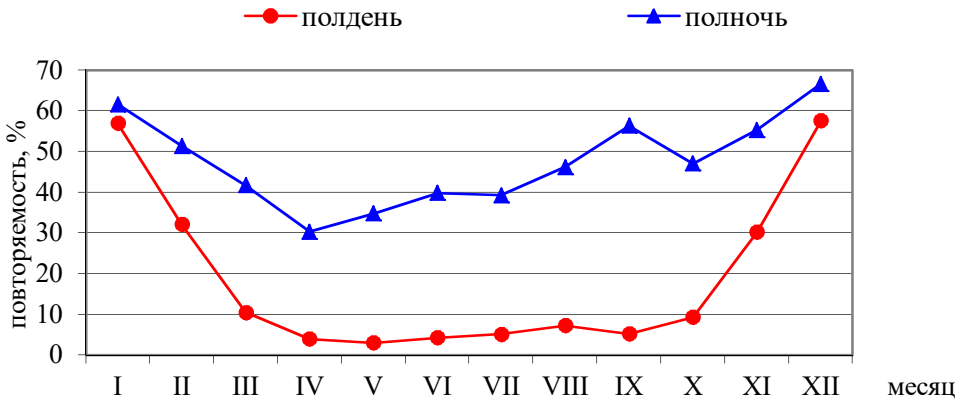


Рис. 5. Сезонный ход повторяемости инверсий в приземном слое в полдень и в полночь в Петропавловске-Камчатском (1980–1998 гг.)

Мощность (верхняя граница) приземной инверсии также зависит от времени суток и сезона. На рис. 6 приведен график сезонного хода характерной мощности приземной инверсии на станции Петропавловск-Камчатский.

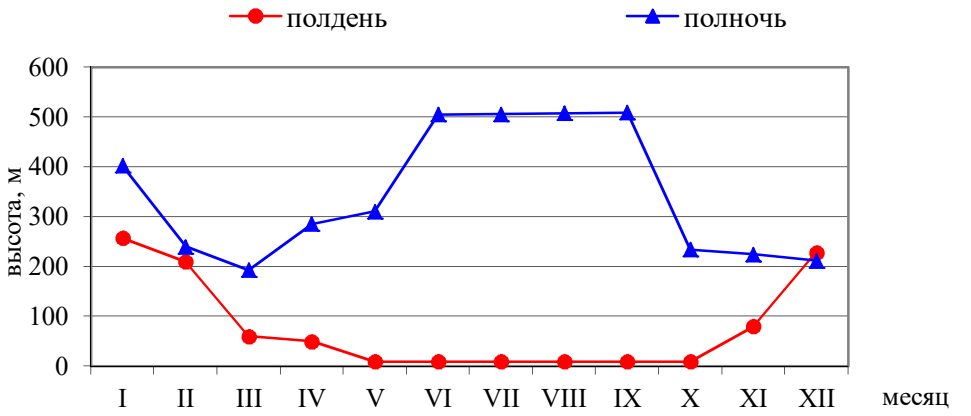


Рис. 6. Сезонный ход верхней границы приземной температурной инверсии в полдень и в полночь в Петропавловске-Камчатском (1980–1998 гг.)

Расчёт характерной мощности приземных инверсий выполнен по среднему профилю температуры воздуха в приземном слое, рассчитанному по данным в день и срок с инверсией. Уточнить результаты расчёта при необходимости можно путём осреднения высот инверсий каждого аэрологического зондирования. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что в ночные часы, особенно в летний период, мощность приземных инверсий существенно выше, чем в дневные часы.

Оценка повторяемости инверсий высотного хода показателя преломления радиоволн, приводящих к сверхрефракции

Ниже на рис. 7 приведены результаты расчёта сезонного хода повторяемости инверсии показателя преломления в приземном слое тропосферы, приводящей к явлению сверхрефракции, по данным массива аэрологического зондирования IGRA. В табл. 2 приведены результаты оценки средней и экстремальных высот приземного волновода.

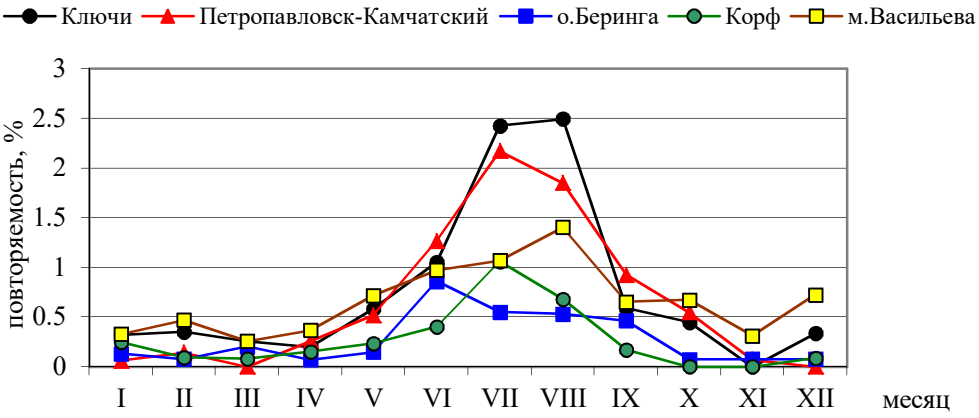


Рис. 7. Сезонный ход повторяемости явления приземной сверхрефракции на аэрологических станциях восточного побережья Камчатки

Таблица 2

Средняя, минимальная (мин.) и максимальная (макс.) мощность приземного волновода вызванного явлением приземной сверхрефракции

Аэрологическая станция	Ключи	Петропавловск-Камчатский	о. Беринга	Корф	м. Васильева
Средняя	27	27	38	42	20
Мин.	2	1	5	6	1
Макс.	127	227	136	148	162

Средняя толщина приземного (приводного) волновода, вызванного явлением приземной сверхрефракции в рассматриваемом района составляет 20–40 м, максимальная достигает примерно 200 м.

Корреляции между инверсией температуры воздуха и показателем преломления радиоволн в приземном слое не выявлено.

Таким образом, по данным аэрологического зондирования повторяемость классического явления сверхрефракции и образования приземного волновода в рассматриваемом районе оказалась невелика и существенно ниже вероятности, определённой путём прямых радиолокационных исследований в сопредельных районах [6]. Максимум повторяемости сверхрефракции по данным аэрологического зондирования отмечается в период июль – август и составляет всего 1–3 %, в остальные месяцы года повторяемость этого явления менее 0,5 %, что подтверждает вывод, сделанный в работе [6] о противоречивости данных непосредственных измерений радиолокационной наблюдаемости результатам анализа данных аэрологических измерений.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что рефракция вряд ли является основным механизмом сверхдальнего распространения звука в рассматриваемом районе в летний период. Возможно, сверхдальнее распространение вызвано другими процессами, в частности, вызванными наличием температурных инверсий, приводящих к формированию слоистых структур в приземном слое атмосферы. Вероятность температурных инверсий в рассматриваемом районе в летний период составляет 20–30 %.

В любом случае представляется важным дальнейшее совершенствования теории дальнего распространения радиоволн и выработка адекватной методической основы для прогнозирования этого явления по данным аэрологического зондирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bean B. R., Dutton E. J. Radio meteorology / National Bureau of Standards Monograph 92, Washington, 1966. – 456 p.
2. Грудинская Г. П. Распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1967. – 244 с.
3. Ненашев В. А., Блаунштейн Н. Ш. Моделирование процесса распространения радиоволн в канале «земля-атмосфера» / Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 6. – С. 25–33. URL: https://www.i-us.ru/jour/article/view/171.
4. Ерёмка В. Д., Кабанов В. А., Логвинов Ю. В., Мыценко И. М. Разсказовский В. Б., Роенко А. Н. Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью. Под ред. В. Б. Разсказовского. – Севастополь: Вебер, 2013. – 217 с.

5. Bean B. R., Cahoon B.A., Samson S.A., Thayer G.D.E. J. Dutton. A world atlas of atmospheric radio refractivity / U. S. Dep. Of Commerce, Environmental science services administration, US Government printing office. – Washington, 1966. – 148 p.
6. Кивва Ф. В., Мыценко И. М., Роенко А. Н. Загоризонтное распространение радиоволн и радиолокационное наблюдение объектов в северо-западной части Тихого океана // Радиофизика и электроника. – 2016. – Т. 7(21). – № 3. – С. 25–32.
7. The radio refractive index: its formula and refractivity data (07/2015) // International Telecommunication Union, P Series Radiowave propagation. Recommendation ITU-R P.453-11. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-11-201507-S!!PDF-E.pdf.

THE ESTIMATION OF THE RECURRENCE OF SOME RADIO METEOROLOGICAL PHENOMENA THAT CONTRIBUTING TO THE OVER-THE-HORIZON PROPAGATION OF RADIO WAVES OVER THE SEA OFF THE EASTERN COAST OF KAMCHATKA

S. I. Mastryukov («GNINGI» JSC)

Under the conditions of increasing demands on the quality of information support for marine activities, attention has increased to estimation the natural conditions affecting the propagation of radio waves over the sea surface. The ability to predict the conditions of propagation of radio waves for the purposes of advance planning of the use of ship radio-technical facilities is becoming more and more relevant. The article considers the possibility of assessing the repeatability of radio meteorological phenomena that contribute to the over-the-horizon propagation of radio waves on the basis of processing the international array of historical data of aerological sensing.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАХМУТОВ Владимир Юрьевич,
канд. воен. н., начальник Научно-исследовательского океанографического центра АО «ГНИНГИ».
E-mail: info@gningi.ru

ВИНОГРАДОВ Константин Анатольевич,
канд. техн. наук, старший научный сотрудник, главный специалист по навигационным гидроакустическим системам, АО «АКВАМАРИН».
E-mail: mail@aquamarin.ru

ЖУКОВ Юрий Николаевич,
докт. техн. н., ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского океанографического центра АО «ГНИНГИ».
E-mail: mail@gningi.ru

ИВАНОВ Станислав Игоревич,
руководитель заказов ОКР, АО «АКВАМАРИН».
E-mail: mail@aquamarin.ru

ИСМАИЛОВ Алескер Исмаилович,
начальник научно-исследовательского отдела АО «ГНИНГИ», докт. техн. н., профессор, засл. деят. науки РФ.
Тел.: +7(905)225-46-30

МАЛЕЕВ Павел Иванович,
докт. техн. н., ведущий научный сотрудник АО «ГНИНГИ».
E-mail: info@gningi.ru

МАСТРЮКОВ Сергей Иванович,
докт. техн. н., ведущий научный сотрудник НИОЦ АО «ГНИНГИ».
E-mail: mastr_si@mail.ru

ФЁДОРОВА Елена Владимировна,
канд. геогр. н., старший научный сотрудник ФГБУ «ГОИН».
E-mail: ev_fedorova55@mail.ru

ЦЫКУНОВ Владислав Николаевич,
адъюнкт Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, майор. E-mail: doz5@yandex.ru

Vladimir Yu. BAKHMUTOV,
Cand. Sc., chief of the Research Oceanographic Center, «GNINGI» JSC.
E-mail: info@gningi.ru

Konstantin A. VINOGRADOV,
CandSc, senior researcher, Chief Specialist of navigation hydroacoustic systems, «AQUAMARIN» JSC.
E-mail: mail@aquamarin.ru

Yuri N. ZHUKOV,
Dr. Sc., leading researcher, Research Oceanographic Center, «GNINGI» JSC.
E-mail: mail@gningi.ru

Stanislav I. IVANOV,
Project manager R&D department, «AQUAMARIN» JSC.
E-mail: mail@aquamarin.ru

Alesker I. ISMAILOV,
Chief of research division, «GNINGI» JSC, DSc, Professor, Honored scientist of the Russian Federation.
Tel.: +7(905)225-46-30

Pavel I. MALEYEV,
DSc, leading researcher, «GNINGI» JSC.
E-mail: info@gningi.ru

Sergei I. MASTRYUKOV,
DSc, leading researcher of the Research Oceanographic Center, «GNINGI» JSC.
E-mail: mastr_si@mail.ru

Elena V. FEDOROVA,
Cand. Sc., senior researcher, the State Oceanographic Institute (SOIN).
E-mail: ev_fedorova55@mail.ru

Vladislav N. TSYKUNOV,
Postgraduate, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Major. E-mail: doz5@yandex.ru

РЕФЕРАТЫ

УДК 359/527

Развитие навигационных комплексов ракетных подводных лодок стратегического назначения в период создания и становления морских стратегических ядерных сил. А. И. Исмаилов. – Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 7–16.

Рассмотрена история становления и развития технических (бортовых) средств навигации ракетных подводных лодок стратегического назначения. Показаны место и роль 9 НИИ ВМФ и его сотрудников в создании и развитии навигационных комплексов подводных ракетоносцев.

Ключевые слова: Военно-морской флот, технические средства навигации, подводная лодка.

УДК 359/527

Навигационно-гидрографическое обеспечение ракетных подводных лодок стратегического назначения в период создания и становления морских стратегических ядерных сил. А. И. Исмаилов. – Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 17–27.

Дан ретроспективный анализ развития технических (бортовых) средств навигации ракетных подводных лодок стратегического назначения. Показаны место и роль 9 НИИ ВМФ и его сотрудников в навигационно-гидрографическом обеспечении создания и становления Морских стратегических ядерных сил Российской Федерации.

Ключевые слова: Военно-морской флот, технические средства навигации, подводная лодка.

УДК 656.6.551.48

Новые возможные направления создания средств высокоточной навигации морских объектов. П. И. Малеев. – Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 28–38.

На основе анализа достижений последних лет в физике и ряда других областей науки выявлены эффекты, явления и поля, пригодные для создания новых высокоточных средств навигации морских объектов. Рассмотрены принципы устройств и работы таких средств. Оценены их ожидаемые точности и другие параметры. Проведен анализ состояния их разработок.

Ключевые слова: средства навигации, морские объекты, гироскопы, сверхпроводимость, сверхтекучесть, сейсмические волны, магнитные поля, средства коррекции.

УДК 629.7

Алгоритм формирования автономной бортовой шкалы времени космического аппарата с использованием технологии приёма и обработки излучения пульсаров в интересах частотно-временного обеспечения ГЛОНАСС. В. Н. Цыкунов. – Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 38–48.

В статье предлагается алгоритм формирования автономной ботовой шкалы времени космического аппарата на основе приёма и обработки излучений нейтронных звёзд (пульсаров) для поддержания качественных показателей частотно-временного обеспечения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС.

Ключевые слова: шкала времени, пульсар, космический аппарат, ГЛОНАСС.

УДК 629.12.053

Об определении относительной скорости АНПА тахометрическим способом. К. А. Виноградов, С. И. Иванов. – Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 49–57.

Предложен способ повышения точности определения относительной скорости АНПА по оборотам его гребного винта. Приводятся результаты проверки предложенного способа по данным, полученным на морских испытаниях опытного образца модуля навигации АНПА «Юнона».

Ключевые слова: подводный аппарат, измерение скорости, точность.

УДК 528.92

Автоматизированный метод обнаружения объектов на морском дне по данным многолучевых гидролокаторов. В. Ю. Бахмутов, Ю. Н. Жуков. – Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 58–65.

Приведен метод автоматизированного обнаружения объектов на морском дне по данным многолучевых гидролокаторов. Метод использует алгоритмы машинного зрения: выделение границ, преобразование Радона, топологической морфологии. Метод позволяет выявить объекты на дне с 95%-ой вероятностью и их местоположение.

Ключевые слова рельеф дна, многолучевой эхолот, машинное зрение, преобразование Радона.

УДК 528.92

Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования уровня моря. Ю. Н. Жуков, Е. В. Федорова – Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 66–75.

Приведены основные элементы методов прогнозирования уровня моря на основе искусственных нейронных сетей. Изменчивость уровня моря представляется двумя способами: нелинейной хаотической динамикой с реконструкцией многомерного фазового пространства и многомерной скалярной функции. Прогноз ориентирован для акваторий с незначительными приливами на основе коротких рядов эквидистантных наблюдений. Описана практическая реализация методов прогноза в виде одностраничного Web-приложения.

Ключевые слова: прогноз, фазовое пространство, уровень моря, искуственные нейронные сети.

УДК 551.58

Современные подходы к оценке климатических рисков. С. И. Мастрюков. – Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 76–82.

В условиях изменения климата возрастает внимание к проблеме управления «климатическими и погодными рисками» и адаптации к изменениям климата. При исследованиях изменений климата в интересах ВМФ невозможно обойтись без применения современного методического аппарата оценки климатических рисков. В работе изложена современная концепция «климатических рисков», принятая Межправительственной группой экспертов по изменениям климата (МГЭИК) и обобщены современные подходы к оценке климатических рисков.

Ключевые слова: климат, климатический риск, исследования, изменение климата.

УДК 551.58

Оценка повторяемости некоторых радиометеорологических явлений, способствующих загоризонтному распространению радиоволн над морем у восточного побережья Камчатки. С. И. Мастрюков. – Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 83–94.

В условиях повышения требований к качеству информационной поддержки морской деятельности возросло внимание к оценке природных условий, влияющих на распространение радиоволн над морской поверхностью. Всё более актуальным становится умение прогнозировать условия распространения радиоволн для целей заблаговременного планирования применения корабельных радиотехнических средств. В статье рассмотрена возможность оценки повторяемости радиометеорологических явлений, способствующих загоризонтному распространению радиоволн на основе обработки международного массива исторических данных аэрологического зондирования.

Ключевые слова: распространиение радиоволн, морская деятельность, радиотехнические средства.

ABSTRACTS

Development of Navigation Complexes Missile Submarines of Strategic in the Period of Creation and Formation of Naval Strategic Nuclear Forces. A. I. Ismailov. – Navigation and Hydrography. – 2019. – No. 57. – P. 7–16.

The history of formation and development of technical (onboard) navigation means missile submarines of strategic is considered. The place and role of 9 research institute of the Navy and its employees in the creation and development of navigation systems for underwater missile carriers is shown.

Key words: Navy, technical means of navigation, submarine.

Navigation and Hydrographic Support Missile Submarines of Strategic in the Period of Creation and Formation of Naval Strategic Nuclear Forces. A. I. Ismailov. – Navigation and Hydrography. – 2019. – No. 57. – P. 17–27.

A retrospective analysis of the development of technical (onboard) means of navigation missile submarines of strategic is given. The place and role of 9 research institute of the Navy and its employees in navigation and hydrographic support of creation and formation of Naval Strategic Nuclear Forces of the Russian Federation are shown.

Key words: Navy, technical means of navigation, submarine.

New Possible Directions of Creation of Means of High-Precision Navigation of Marine Objects. P. I. Maleev. – Navigation and Hydrography. – 2019. – No. 57. – P. 28–38.

On the basis of the analysis of achievements of the last years in physics and a number of other areas of science the effects, phenomena and fields suitable for creation of new high-precision means of navigation of marine objects are revealed. The principles of the device and operation of such means are considered. Their expected accuracy and other parameters are estimated. The analysis of the state of their development.

Key words: means of navigation, marine objects, gyroscopes, superconductivity, superfluidity, seismic waves, magnetic field, the correction means.

The Algorithm of Formation of an Autonomous Onboard Time Scale of the Spacecraft Using the Technology of Receiving and Processing Radiation of Pulsar in the Interests of Time-Frequency Support of GLONASS. V. N. Tsykunov. – Navigation and Hydrography. – 2019. – No. 57. – P. 38–48.

The article proposes an algorithm for the formation of an Autonomous onboard time scale of the spacecraft based on the reception and processing of neutron stars radiation (pulsars) to maintain quality indicators of the time-frequency support of the GLONASS global navigation satellite system.

Key words: time scale, pulsar, spacecraft, GLONASS.

On Determining the Relative Speed of Autonomous Underwater Vehicles by Tachometric Method. K. A. Vinogradov, S. I. Ivanov. – Navigation and Hydrography. – 2019. – No. 57. – P. 49–57.

A method for increasing the accuracy of determining the relative velocity of the AUV by the revolutions of its propeller is proposed. The results of verification of the proposed method according to the data obtained at marine tests of the prototype of the navigation module AUV «Junona» are presented.

Key words: underwater vehicle, speed measurement, accuracy.

An Automated Method for Detecting Objects on the Seabed According to Multibeam Sonar. V. Yu. Bakhmutov, Yu. N. Zhukov. – Navigation and Hydrography. – 2019. – No. 57. – P. 58–65.

The method of automated detection of objects on the seabed according to multibeam sonar is given. The method uses machine vision algorithms: boundary detection, Radon transformation, topological morphology. The method allows to identify objects on the seabed with 95% probability and their location.

Key words: bottom relief, multibeam echo sounder, machine vision, Radon transformation.

Application of Artificial Neural Networks for Sea Level Forecasting. Yu. N. Zhukov, E. V. Fedorova. – Navigation and Hydrography. – 2019. – No. 57. – P. 66–75.

The basic elements of sea level forecasting methods based on artificial neural networks are presented. Sea level variability is represented in two ways: by nonlinear chaotic dynamics with reconstruction of a multidimensional phase space and a multidimensional scalar function. The forecast is oriented for water area with insignificant tides based on short series of equidistant observations. The practical implementation of forecasting methods in the form of a one-page Web application is described.

Key words: forecast, phase space, sea level, artificial neural network.

Modern Approaches to Climate Risks Estimation. S. I. Mastryukov. – Navigation and Hydrography. – 2019. – № 57. – P. 76–82.

In the context of climate change, increasing attention is paid to the problem of managing “climate and weather risks” and adaptation to climate change. When studying climate change in the interests of the Navy, it is impossible to do without using the modern methodological apparatus of estimation climate risks. The paper presents the modern concept of "climate risks" adopted by the intergovernmental panel on climate change (IPCC) and summarizes modern approaches to climate risks estimation.

Key words: climate, climate risk, research, climate change.

The Estimation of the Recurrence of Some Radio Meteorological Phenomena that Contributing to the Over-the-Horizon Propagation of Radio Waves Over the Sea Off the Eastern Coast of Kamchatka. S. I. Mastryukov. – Navigation and Hydrography. – 2019. – No. 57. – P. 83–94.

Under the conditions of increasing demands on the quality of information support for marine activities, attention has increased to estimation the natural conditions affecting the propagation of radio waves over the sea surface. The ability to predict the conditions of propagation of radio waves for the purposes of advance planning of the use of ship radio-technical facilities is becoming more and more relevant. The article considers the possibility of assessing the repeatability of radio meteorological phenomena that contribute to the over-the-horizon propagation of radio waves on the basis of processing the international array of historical data of aerological sensing.

Key words: radio wave propagation, Maritime activities, and radio equipment.

ИНФОРМАЦИЯ

Глубокоуважаемые коллеги!

Приглашаем Вас к сотрудничеству в журнале **«Навигация и гидрография»**, издаваемом с 1995 г. Государственным научно-исследовательским навигационно-гидрографическим институтом.

В журнале публикуются результаты исследований в области навигации, гидрографии, океанографии, гидрометеорологии, морской картографии, морской геофизики и экологии. Издание освещает концептуальные научные положения и осуществляет оперативную публикацию новейших теоретических исследований, знакомит с передовыми техническими достижениями, с материалами симпозиумов, конференций и хроникой важнейших событий научной жизни. Статьи журнала рецензируются.

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук».

Журнал выходит четыре раза в год и распространяется по подписке. Кроме того, он рассылается в крупнейшие библиотеки России, центры научно-технической информации, органы военного управления различного уровня, научно-технические библиотеки высших военно-морских учебных заведений и научно-исследовательских организаций.

Информация для авторов

Статьи принимаются в формате MS Word с приложением текста на бумаге (шрифт – Times New Roman размером 14, межстрочный интервал 1,5). Все материалы должны быть подписаны автором (авторами).

Объем статьи без аннотации и списка литературы – от 15 до 30 тыс. печатных знаков, включая пробелы.

Название статьи должно в наиболее краткой форме отражать ее содержание.

В статье указывается *индекс УДК*. К работе прилагаются ***аннотация, ключевые слова и сведения об авторах на русском и английском языках.***

В аннотации приводятся сведения, которые дополняют название и характеризуют тему статьи, рассмотренную проблему, цель и полученные результаты.

В качестве ключевых приводятся слова или словосочетания из текста статьи, несущие существенную смысловую нагрузку с точки зрения информационного поиска. Выбор ключевых слов должен осуществляться по всему тексту статьи с охватом основных смысловых аспектов её содержания.

В сведениях об авторах указываются: фамилия, имя, отчество; ученая степень; учёное звание; место работы с указанием полного наименование учреждения и должности; адрес электронной почты.

К рукописи прилагается *сопроводительное письмо* организации, в которой работает автор, и один экземпляр ***экспертного заключения*** о возможности открытого опубликования представленных материалов. ·

Для написания формул и символов следует использовать встроенный в пакет *MS Office* редактор формул в формате «отображаемый».

Кириллица, греческие буквы, скобки и цифры всегда набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набираются *курсивом* как в формулах, так и в тексте, кроме устойчивых форм (max, min, cos, sin, tg, log и пр.)

Используемые в статье *величины и единицы измерения* должны соответствовать стандартным обозначениям согласно Международной системе единиц СИ.

Рисунки должны быть вставлены в текст как *графический* файл, иметь порядковые номера и подписи.

Таблицы должны иметь порядковые номера и названия. Допускается только вертикальная ориентация таблиц, ширина не должна превышать 140 мм.

Список использованной литературы составляется на языке оригинала (исключение – языки с иероглифическим написанием слов) в порядке ссылок на источники по тексту. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, где указывается номер работы по списку. В списке литературы указываются: фамилии и инициалы авторов, полное название книги или статьи, название сборника, город, издательство, год, том, номер, страницы.

Подписка на журнал «Навигация и гидрография»

Журнал «Навигация и гидрография» включён в каталог «Издания органов научно-технической информации» агентства «Роспечать». Подписной индекс 60941.

Периодичность выхода – четыре номера в год.

Стоимость одного номера 250 руб., включая НДС 18%.

Для заказа издания непосредственно в редакции необходимо направить в адрес редакции заявку в произвольной форме с указанием номера(ов) журнала, контактных данных и реквизитов заказчика.

Архив журнала в формате PDF доступен на сайте АО «ГНИНГИ» www.gningi.ru.

Адрес редакции: АО «ГНИНГИ»,
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41,
Телефон/факс: (812) 327-99-80
E-mail: mail@gningi.ru; info@gningi.ru

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ, 2019, № 57

Научный редактор П. И. Малеев

Редактор И. Ю. Бугрова

Технический редактор В. Ю. Бахмутов

Подписано в печать 24.09.2019 г.
Тираж 300 экз.
Заказ № 32/03 от 25.09.2019 г.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-43932.

Подписной индекс в каталоге «Издания органов НТИ» Агентства «Роспечать» 60941.

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание
ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук».

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

**© АО «Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт»**