ISSN 2220-0983

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

60/2020

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

Санкт-Петербург

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

ИЗДАЕТСЯ С 1995 ГОДА

60
2020

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»
2020

THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC INSTITUTE

NAVIGATION AND HYDROGRAPHY

PUBLISHED SINCE 1995

60
2020

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»

2020

СОДЕРЖАНИЕ

НАВИГАЦИЯ

Национальная морская политика Российской Федерации на Арктическом региональном направлении. Приоритетные направления развития навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в Арктической зоне. А. И. Исмаилов, А. А. Лобанов, В. В. Пучнин 7

Методика оценивания влияния структуры орбитальной группировки космических аппаратов на эффективность решения навигационной задачи псевдодальномерным методом. К. А. Крупский, М. Г. Кудинов, А. С. Шавин, А. Б. Спесивцев 16

Способ измерения абсолютной угловой скорости линейными акселерометрами. П. И. Малеев 24

Модель движения судна на основе нейронных сетей. В. В. Дерябин 32

Инерциальная навигационная система на одних лишь акселерометрах. П. И. Малеев 43

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

Метод построение координатной системы для навигации по полю рельефа дна. В. Ю. Бахмутов, Ю. Н. Жуков 46

Комплексные исследования в Северном Ледовитом океане в 2019 году. В. Ю. Бахмутов, Е. В. Колобов, А. В. Костенич, Н. В. Червякова, Д. М. Жилин 55

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Особенности приливных колебаний на открытых акваториях. Ю. Н. Жуков, Е. В. Федорова 68

Особенности изменения синоптических процессов, формирующих волны холода в г. Санкт-Петербурге в зимний период. Ю. В. Ефимова, Я. Б. Бабич, Л. О. Неелова, Н. С. Еремина, А. И. Н. Мханна, И. В. Лаврова 80

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 89

РЕФЕРАТЫ 91

CONTENTS

NAVIGATION

The National Maritime Policy of the Russian Federation on the Arctic Regional Direction. Priority Directions of the Development of Navigation-Hydrographic and Hydrometeorological Support for Maritime Activities in the Arctic Zone. A. I. Ismailov, A. A. Lobahov, V. V. Puchnin.. 7

Methodology for Evaluating the Influence of the Structure of the Orbital Grouping of Spacecraft on the Efficiency of Solving the Navigation Problem by the Pseudo-Long-Range Method. K. A. Krupskiy, M. G. Kudinov, A. S. Shavin, A. B. Spesivtsev.. 16

The Method for Measuring Absolute Angular Velocity by the Linear Accelerometers. P. I. Maleev..... 24

Ship Motion Model Based on Neural Networks. V. V. Deryabin. 32

Inertial Navigation System Based on Accelerometers Alone. P. I. Maleev..... 43

HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY

Method for Constructing a Coordinate System for Navigating the Field the Seabed Topography. V. Yu. Bakhmutov, Yu. N. Zhukov..... 46

Comprehensive Research in the Arctic Ocean in 2019. V. Yu. Bakhmutov, E. V. Kolobov, A. V. Kostenich, N. V. Chervyakova, D. M. Zhilin.. 55

HYDROMETEOROLOGY

The Features of Tidal Oscillations in Open Water Areas. Yu. N. Zhukov, E. V. Fedorova.. 68

The Circulating Changes that Affected the Formation of the Cold Wave in the City.St. Petersburg During the Winter Period. Y. V. Efimova, Y. B. Babich, L. O. Neelova, N. S. Eremina, A. I. N. Mkanna, I. V. Lavrova..... 80

INFORMATION ABOUT AUTHORS..... 89

ABSTRACTS 91

НАВИГАЦИЯ

УДК 351/354

НАЦИОНАЛЬНАЯ МОРСКАЯ ПОЛИТИКА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ. ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

А. И. ИСМАИЛОВ, А. А. ЛОБАНОВ, В. В. ПУЧНИН
(АО «ГНИНГИ»)

В статье на основе анализа основных вызовов и угроз национальной безопасности Российской Федерации показаны приоритеты национальной морской политики на Арктическом региональном направлении, показано место навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения в реализации национальной морской политики в Арктическом бассейне, предложены основные направления развития навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в Арктической зоне.

Национальная морская политика Российской Федерации была и остается важной и ответственной областью политики государства и общества. Она направлена на определение, реализацию и защиту национальных интересов в Мировом океане с целью формирования благоприятных условий для морской деятельности Российской Федерации [1]. Морская деятельность включает в себя изучение, освоение, использование, охрану и сохранение ресурсов и пространств Мирового океана в интересах устойчивого развития и обеспечения национальной безопасности Российской Федерации [2].

Развитие Российской Федерации в современном мире происходит на фоне новых вызовов и угроз национальной безопасности, что в первую очередь связано с ее геополитическим положением и ролью в мировой политике. Россия возвратилась к статусу великой державы и не намерена останавливаться на этом пути.

Основными источниками вызовов и угроз безопасности Российской Федерации являются недружественные и даже враждебные действия Соединенных Штатов Америки и их союзников. Военно-политическое руководство США стремится любой ценой удержать мир в однополярном формате, не дать возможности России возродиться как великой державе [3].

Новыми рисками и вызовами для Российской Федерации являются трудно прогнозируемые и внезапно возникающие в мире пандемии опасных заболеваний. Пандемия коронавируса 2020 года принесла не только глобальный экономический кризис, но и геополитическую неопределенность в мире, связанную со стремлением

ведущих государств к изменению существующего миропорядка, усилила деглобализацию и борьбу за лидерство в мире, повысила значимость национальных экономик и государственного управления. Кроме того, в международных отношениях повышается роль фактора военной силы, для чего ведущие мировые державы, продолжают существенно наращивать свой военно-морской потенциал и военно-морское присутствие в основных районах Мирового океана, в том числе, в морских пространствах, непосредственно прилегающих к территории Российской Федерации.

В современном мире к основным вызовам и угрозам национальной безопасности Российской Федерации и ее устойчивому развитию, связанным с Мировым океаном, относятся [4, 5]:

а) стратегический курс США на превращение НАТО в глобальный инструмент своей политики, способный влиять не только на Европу, но и другие регионы мира, включая перспективы использования возможностей блока в борьбе за энергетические ресурсы и коммуникации в Арктике;

б) стремление ряда государств, прежде всего, США и их союзников, к доминированию в Мировом океане, ограничению доступа Российской Федерации к ресурсам Мирового океана и ее выхода на жизненно важные морские транспортные коммуникации, а также к достижению подавляющего превосходства своих военно-морских сил;

в) наличие территориальных претензий иностранных государств к Российской Федерации в отношении ряда ее приморских и островных территорий;

г) увеличение количества государств, обладающих мощными военно-морскими силами, с помощью которых возрастает вероятность силового разрешения межгосударственных противоречий в Мировом океане;

д) официальное закрепление в доктринальных документах НАТО за Россией статуса противника, следствием чего является продвижение военной инфраструктуры блока к границам Российской Федерации, с возрастанием количества проводимых учений НАТО в странах Балтии, Польше и Норвегии, акваториях Черного, Балтийского и Норвежского морей;

е) незавершенность международного правового разграничения морских пространств в Арктике и попытки пересмотра базовых положений международного права, регулирующих деятельность в Арктике;

ж) попытки ослабления контроля Российской Федерации над Северным морским путем (СМП), наращивание военного присутствия зарубежных государств в Арктике и возрастание конфликтного потенциала в регионе;

з) экономическое, политическое, международно-правовое, информационное и военное давление на Российскую Федерацию в целях снижения эффективности ее морской деятельности в Мировом океане;

и) наличие и эскалация очагов вооруженных конфликтов на территориях, имеющих геополитическое значение для Российской Федерации и ее союзников, а также на территориях государств, имеющих выход к Мировому океану;

к) глобальное влияние Мирового океана на атмосферные процессы и изменение климата на планете, который характеризуется увеличением частоты и возрастанием интенсивности стихийных природных явлений, негативно влияющих на морскую деятельность Российской Федерации;

л) существенная зависимость внешнеторговой деятельности Российской Федерации от морских перевозок и функционирования морских трубопроводных систем;

м) недостаточное участие российского торгового флота в международных перевозках и малая доля судов, плавающих под Государственным флагом Российской Федерации, в тоннаже мирового торгового флота;

н) введение рядом крупных иностранных государств ограничений, распространяющихся на российские нефтегазовые компании, включая поставки современных технологий и оборудования, а также привлечение долгосрочного финансирования.

Многовековая морская история российского государства свидетельствует, что, начиная с XVIII века [6], Россия удачно сочетала достоинства морского и континентального цивилизационных направлений, развивалась не только как сухопутная, но и как морская держава. Более трех столетий Россия входит в число ведущих морских держав мира. Развитие и мощь флота создает особый потенциал континентальной России, придавая ей новое качество в успешном соперничестве с мировыми державами и отстаивании своих национальных интересов в Мировом океане.

Значение Мирового океана для всего мира и Российской Федерации в долгосрочной перспективе будет неуклонно расти в связи с истощением природных ресурсов суши, воздействием хозяйственной и иной деятельности человека на окружающую среду, таянием арктических льдов, миграцией населения. Современный этап развития человечества характеризуется повышением интенсивности использования Мирового океана, расширением экономической и научной деятельности на континентальном шельфе и дне Мирового океана. Развитие морской деятельности и морского потенциала государства является одним из решающих условий устойчивого социально-экономического развития Российской Федерации в XXI веке.

Одним из наиболее важных для Российской Федерации в экономическом и военно-стратегическом отношении является Арктическое региональное направление (Арктическая зона), включающее северные окраины материков Евразия и Северная Америка (кроме центральной и южной частей полуострова Лабрадор), остров Гренландия (кроме южной части), Северный Ледовитый океан (кроме восточной и южной частей Норвежского моря) с островами, а также прилегающие части Атлантического и Тихого океана [7].

Национальная морская политика Российской Федерации в Арктической зоне должна строиться, исходя из географических и социально-экономических особенностей региона, а также его геополитической и военно-стратегической значимости для государства.

Арктическая зона Российской Федерации – территории, отнесенные к сухопутным территориям Арктической зоны Российской Федерации, а также прилегающие к этим территориям внутренние морские воды, территориальное море, исключительная экономическая зона и континентальный шельф Российской Федерации [8].

Арктическая зона включает в себя акваторию Северного Ледовитого океана с расположенными в ней островами, прибрежную полосу суши и воздушно-космическое пространство над ними [7]. Именно к Северному Ледовитому океану

развернулась Россия своим морским фасадом. Здесь проходит самая протяженная ее морская граница. Вдоль северных берегов нашей страны проложен кратчайший морской путь из Атлантического океана в Тихий. Здесь на континентальном шельфе обнаружены значительные запасы углеводородного сырья. В границах Арктической зоны расположены операционные зоны двух флотов Российской Федерации – Северного и Тихоокеанского.

Военно-стратегическое значение Арктической зоны для России определяется несколькими важными факторами. Так, в Арктической зоне России находится значительная часть российского ракетно-ядерного потенциала, военно-космических объектов и средств, объектов оборонной инфраструктуры стратегического значения. Это Северный флот России, космодром Плесецк, Центральный ядерный полигон на Новой Земле, предприятия оборонно-промышленного комплекса, а также существующие и находящиеся в стадии реализации стратегические объекты промышленности и транспортной инфраструктуры. Здесь пролегают кратчайшие пути для развертывания сил Северного флота в Атлантику.

Большая часть Арктической зоны расположена в пределах Северного стратегического воздушно-космического направления, на котором США планируют применить до 50 % своих межконтинентальных баллистических ракет, значительную часть стратегических бомбардировщиков и крылатых ракет морского базирования [4].

Оперативно-стратегическое значение Арктической зоны определяется ещё и тем, что здесь расположены районы патрулирования американских ракетных подводных лодок и районы маневрирования авианосных ударных групп и других корабельных группировок ВМС США и НАТО, располагающих мощным ядерным и ракетным потенциалом.

Господство США в Арктике может серьезно ослабить стратегические ядерные силы России, а в перспективе – и нейтрализовать российский потенциал ядерного сдерживания.

Происходящие климатические изменения в Арктике ведут к расширению свободной ото льда зоны и способствуют развертыванию здесь дополнительных группировок военно-морских и воздушно-космических сил и средств приарктических государств, наращиванию морских перевозок. Все это делает Арктику важнейшим регионом как в экономическом отношении, так и с точки зрения демонстрации мощи и обеспечения безопасности Северной Америки, Азии и Европы.

Арктические страны – США, Россия, Норвегия, Канада и Дания (Гренландия) – стараются закрепить за собой права на спорные территории последней нетронутой части земного шара. Частично это происходит из-за того, что отступающие льды делают доступными для эксплуатации крупные залежи углеводородов, которые составляют до 13 % неразведанных мировых запасов нефти и до 30 % природного газа. Две эти темы – природные ресурсы и стратегия – неизбежно ведут к росту мирового геополитического противостояния.

Арктика является местом пересечения национальных интересов не только приарктических, но и других государств. Более двух десятков стран заявили о своей готовности разрабатывать месторождения полезных ископаемых на арктическом шельфе. Появляется стремление отдельных развитых стран вести добычу ресурсов морского дна без каких-либо обязательств в отношении других стран. Постоянно

предпринимаются попытки интернационализации Северного морского пути. Не прекращается милитаризация арктического пространства.

В связи с усилившимися военными угрозами в целях повышения безопасности государства с арктического направления решением военно-политического руководства Российской Федерации с 1 декабря 2014 года Северный флот был выведен из состава Западного военного округа, и на его базе было создано арктическое Объединенное стратегическое командование, усиленное дислоцированными в Заполярье силами и средствами Западного, Центрального и Восточного военных округов, а с 1 января 2021 года Указом Президента Российской Федерации Северный флот будет приравнен к военному округу. В состав Северного флота как новой военно-административной единицы войдут республика Коми, территории Архангельской и Мурманской областей и Ненецкий АО, которые будут выведены из границ Западного военного округа.

Обобщая вышесказанное, с учётом Указа Президента [9] можно утверждать, что национальная морская политика Российской Федерации на Арктическом региональном направлении определяется значительными минеральными и энергетическими богатствами исключительной экономической зоны и континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане, возрастающим значением Северного морского пути в системе мировых транспортных коммуникаций, решающей ролью Северного флота в обеспечении обороны страны в Арктической зоне, а также превращением Арктики в регион глобальной конкуренции не только с экономической, но и с военной точки зрения. Российская Федерация считает, что Арктика должна быть безопасным и стабильным регионом, в котором надежно защищены все национальные интересы и военная безопасность России, а все приарктические страны и другие государства, заинтересованные в этом регионе, должны активно сотрудничать на принципах взаимного учета интересов.

Учитывая все отмеченные факторы, приоритетами национальной морской политики на Арктическом региональном направлении можно считать:

а) упрочение лидирующих позиций Российской Федерации в изучении и освоении морских пространств Арктики, включая проведение геологоразведочных работ, обновление имеющихся данных по месторождениям полезных ископаемых и безопасное освоение месторождений природных ресурсов континентального шельфа арктических морей;

б) снижение уровня угроз национальной безопасности Российской Федерации и обеспечение стратегической стабильности в Арктическом регионе;

в) обеспечение благоприятного оперативного режима в Арктической зоне Российской Федерации за счет укрепления военного потенциала сил (войск) Северного флота и органов федеральной службы безопасности, модернизации и расширения объектов военно-морской и пограничной инфраструктуры в Арктической зоне;

г) широкое освоение природных ресурсов, прежде всего, топливно-энергетических в исключительной экономической зоне и на континентальном шельфе Арктической зоны Российской Федерации, создание благоприятных условий для деятельности в них российских нефтегазодобывающих и газотранспортных компаний;

д) создание условий для развития Северного морского пути как национальной транспортной магистрали Российской Федерации в Арктике, включая всестороннее развитие его портово-прибрежной инфраструктуры, формирование опорных зон развития и обеспечение их функционирования;

е) осуществление военного-силового контроля Северного морского пути и недопущение военно-морской деятельности иностранных государств в его пределах;

ж) осуществление перевозок углеводородного сырья, добытого или переработанного в пределах Арктической зоны Российской Федерации, морскими судами, плавающими под Государственным флагом Российской Федерации;

з) осуществление активного взаимодействия с приарктическими государствами в целях разграничения морских пространств, в том числе арктического шельфа, на основе норм международного права, взаимных договоренностей с учетом национальных интересов Российской Федерации;

и) формирование промышленной, технологической и научной базы хозяйственного освоения арктических приморских территорий и прилегающих акваторий;

к) повышение эффективности государственного управления социально-экономическим развитием Арктической зоны Российской Федерации, включая совершенствование системы государственного управления морской деятельностью в Арктике;

л) создание единой защищенной информационной телекоммуникационной системы транспортного комплекса Арктической зоны Российской Федерации;

м) осуществление комплексной защиты природной среды арктических акваторий, находящихся под юрисдикцией Российской Федерации;

н) развитие систем мониторинга обстановки в Арктике, в том числе контроля радиационной обстановки в местах захоронения радиоактивных отходов и атомных реакторов атомных подводных лодок и атомных ледоколов в акватории архипелага Новая Земля;

о) завершение работ по юридическому закреплению внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане.

Как указано в статье [10], реализация национальной морской политики Российской Федерации на Арктическом региональном направлении, включая морскую оборонную и экономическую деятельности государства в рассматриваемом регионе, требует создания соответствующих систем обеспечения, адекватных целям и задачам указанной политики. Одной из таких систем является система навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения (НГГМО) морской деятельности Российской Федерации в Арктической зоне.

Анализ современного состояние навигационно-гидрографического (НГО) и гидрометеорологического обеспечения (ГМО) морской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации показал, что рассматриваемый вид обеспечения в целом не отвечает современным требованиям и нуждается в значительном обновлении и совершенствовании. Эта же проблема касается безопасного в навигационном отношении функционирования Северного морского пути.

С учетом геополитической, экономической и военной значимости СМП, маршрут которого проходит через всю Арктическую зону, главной целью совершенствования НГО и ГМО морской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации целесообразно считать превращение СМП не позднее

2030 года в безопасную, конкурентоспособную и круглогодично функционирующую мировую транспортную коммуникацию.

Для достижения указанной цели приоритетными направлениями развития *навигационно-гидрографического обеспечения* морской деятельности в Арктической зоне авторы предлагают считать:

а) выполнение комплекса гидрографических работ, океанографических и морских геофизических исследований в Арктической зоне в интересах НГО безопасного круглогодичного функционирования СМП;

б) совершенствование нормативно-правовой базы и устранение существующих пробелов и противоречивости отдельных правовых норм, а также дублирования ряда функций федеральных органов исполнительной власти в области НГО безопасности плавания по СМП;

в) оборудование (дооборудование) побережья и морей Арктической зоны Российской Федерации необходимыми современными средствами навигационного оборудования, поддержание установленных режимов их работы;

г) развитие независимых отечественных навигационных систем, инструментальных средств, методов и технологий НГО навигационной безопасности функционирования СМП;

д) создание и поддержание на уровне современных требований комплекта навигационных и электронных карт, изданий и пособий СМП и других районов Северного Ледовитого океана;

е) государственный контроль за стандартизацией, сертификацией, техническим регулированием, аккредитацией и лицензированием деятельности по оказанию государственных услуг в области НГО безопасности морской деятельности;

ж) продолжение работы по уточнению местоположения прямых исходных линий вдоль арктического побережья Российской Федерации для отсчета ширины территориальных вод, экономической зоны и континентального шельфа.

Важное место в обеспечении безопасности функционирования Северного морского пути занимает *гидрометеорологическое обеспечение*. К приоритетным направлениям развития ГМО морской деятельности в Арктической зоне в целом и СМП в частности авторы в целом относят:

а) совершенствование (модернизация) пунктов морской государственной гидрометеорологической сети, систем и средств морского и наземного базирования гидрометеорологического назначения в Арктической зоне, включая СМП, поддержание их в рабочем состоянии;

б) обеспечение количественного и качественного роста отечественной орбитальной группировки космических аппаратов, используемых для гидрометеорологического, океанографического и гелиогеофизического обеспечения морской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации;

в) оперативное доведение до судов, следующих СМП, а также других субъектов морской деятельности в Арктической зоне фактической и прогностической информации об опасных морских гидрометеорологических явлениях, о состоянии и прогнозах изменения ледовой обстановки и других сведениях, касающихся безопасности мореплавания по СМП и другим районам Северного

Ледовитого океана;

г) совершенствование единой взаимоувязанной государственной подсистемы сбора, обработки, анализа, хранения и использования информации о состоянии морских пространств в Арктической зоне;

д) развитие российского научно-экспедиционного флота в Арктической зоне, подведомственных федеральному органу исполнительной власти в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды;

е) проведение регулярных комплексных научных исследований гидрометеорологических процессов в Арктике, состояния и изменений морской арктической среды в условиях активного антропогенного воздействия, учет роли и места Арктического бассейна в глобальных климатических процессах;

ж) совершенствование государственного контроля за сертификацией, стандартизацией, техническим регулированием, аккредитацией и лицензированием осуществления гидрометеорологической деятельности в области обеспечения безопасности морской деятельности Российской Федерации в Арктической зоне;

з) расширение научных исследований по разработке современных технологий и методов прогноза опасных для морской деятельности в Арктической зоне природных явлений и изменения климата.

Дополнительно на Арктическом региональном направлении, по мнению авторов, необходимо продолжить морские научные исследования и изыскания в целях обоснования и расширения внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане, а также работы по их юридическому закреплению.

Выполнение существенной части указанных приоритетных направлений совершенствования НГО морской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации, прежде всего, в интересах безопасного круглогодичного функционирования СМП, может быть положено в перспективный план работы нашего института, в том числе в инициативном порядке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Военная доктрина Российской Федерации [Электронный ресурс]: Доктрина (в действующей редакции): утверждена Президентом РФ 25 декабря 2014 г. № Пр-2976. – Электрон. дан. – Гарант: информационно-правовой портал. – Код доступа – www.garant.ru.
2. Основы государственной политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2030 года [Электронный ресурс]: Основы: утверждены Указом Президентом РФ от 20 июля 2017 года № 327. – Электрон. дан. – Гарант: информационно-правовой портал. – Код доступа – www.garant.ru.
3. Кокошин А. А., Панов А. Н. Макроструктурные изменения в системе мировой политики до 2030 года. – М.: КРАСАНД, 2016. – 336 с.
4. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс]: стратегия (в действующей редакции): утверждена Указом Президента РФ от 31 декабря 2015 г. № 683. – Электрон. дан. – КонсультантПлюс – надёжная правовая поддержка. – Код доступа – www.consultant.ru.
5. Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]: стратегия: утверждена распоряжением Правительства РФ от 30 августа 2019 г. № 1930-р (в действующей редакции). – Электрон. дан. – КонсультантПлюс: надёжная правовая поддержка. – Код доступа: www.consultant.ru.
6. Военно-Морской Флот [Электронный ресурс]: официальное интернет-представительство Министерства обороны Российской Федерации. Электрон. дан. – Минобороны России. – Код доступа: structure.mil.ru.

7. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года [Электронный ресурс]: Основы (в действующей редакции): утверждена Указом Президента РФ от 5 марта 2020 г. № 164. – Электрон. дан. – КонсультантПлюс – надёжная правовая поддержка. – Код доступа – www.consultant.ru.
8. Сухопутные территории Арктической зоны Российской Федерации [Электронный ресурс]: руководящий документ (в действующей редакции): утвержден Указом Президента РФ от 2 марта 2014 г. № 296. – Электрон. дан. – КонсультантПлюс: надёжная правовая поддержка. – Код доступа: www.consultant.ru.
9. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года [Электронный ресурс]: руководящий документ (в действующей редакции): утвержден Указом Президента РФ от 7 мая 2014 г. № 204. – Электрон. дан. – КонсультантПлюс: надёжная правовая поддержка. – Код доступа: www.consultant.ru.
10. Комарицын А. А. Навигационно-гидрографическое и гидрометеорологическое обеспечение морской деятельности в Арктике. – Материалы науч.-практ. конф. «Русский Север в системе геополитических интересах России» / Рос. акад. гос. службы при Президенте Российской Федерации, Помор. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – М.: Социум, 2002. – С. 33–40.

THE NATIONAL MARITIME POLICY OF THE RUSSIAN FEDERATION ON THE ARCTIC REGIONAL DIRECTION. PRIORITY DIRECTIONS OF THE DEVELOPMENT OF NAVIGATION-HYDROGRAPHIC AND HYDROMETEOROLOGICAL SUPPORT FOR MARITIME ACTIVITIES IN THE ARCTIC ZONE

A. I. Ismailov, A. A. Lobahov, V. V. Puchnin («GNINGI», JSC)

The article on the basis of the analysis of the main challenges and threats to the national security of the Russian Federation shows the priorities of the national maritime policy on the Arctic regional direction, shows the place in the navigation-hydrographic and hydrometeorological support in the implementation of national maritime policy in the Arctic basin, suggested that the main directions of development of navigation-hydrographic and hydrometeorological support of maritime activities in the Arctic zone.

УДК 629.783

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПСЕВДОДАЛЬНОМЕРНЫМ МЕТОДОМ

К. А. КРУПСКИЙ, М. Г. КУДИНОВ,
А. С. ШАВИН, А. Б. СПЕСИВЦЕВ
(ВКА имени А. Ф. Можайского)

Рассматривается оценка влияния структуры орбитальной группировки навигационных космических аппаратов и условий видимости их на точность и возможность решения навигационной задачи псевдодальномерным методом. Даны рекомендации по учету влияния структуры орбитальной группировки навигационных космических аппаратов на качество навигации.

Введение

Точность решения навигационной задачи зависит от качества эфемеридно-временного обеспечения космической навигационной системы (*SIS URE* – эквивалентная погрешность псевдодальности за счет космического сегмента, т. е. за счет погрешности бортовой эфемеридно-временной информации), учета особенностей среды распространения (*UAE* – погрешность псевдодальности за счет среды распространения сигнала, различная для одночастотной, двухчастотной и трехчастотной аппаратуры, с использованием и без использования метеопараметров) и условий приема навигационного сигнала (*UEE* – погрешность псевдодальности за счет условий приема навигационных сигналов в наземной аппаратуре и погрешности аппаратуры спутниковой навигации).

Относительным показателем, непосредственно влияющим на точность решения навигационной задачи, является позиционный фактор снижения точности (*PDOP*), который зависит от орбитального построения космической навигационной системы, положения потребителя и видимости навигационных космических аппаратов (НКА), определяемой значением угла места относительно потребителя.

Возможность получения пространственных координат потребителя определяется количеством видимых НКА.

Стандарт эксплуатационных характеристик ГЛОНАСС содержит требования вероятностных и интервальных оценок показателей качества системы и включает требования к количеству НКА системы (не менее 21, без учета построения) и наблюдаемости НКА, когда угол его возвышения относительно плоскости местного горизонта превышает минимально допустимое значение или равен ему (угол места равен или более 5°). При этом влияние локальных источников затенения навигационного сигнала не рассматривается [1].

Однако существует потребность решения навигационной задачи в условиях ограниченной видимости НКА, т. е. при значениях угла места, превышающих 5°, при структуре орбитальной группировки (ОГ) НКА, отличной от номинальной.

Таким образом, необходимо оценить влияние структуры ОГ НКА и условий видимости НКА на точность и возможность решения навигационной задачи.

Постановка задачи

Дано:

момент времени начала расчета, $T_0 = 0$ с;

момент времени окончания расчета, $T = 86400$ с (1 сутки);

шаг расчета по времени, $\Delta t = 1$ с;

шаг равномерной аналитической сетки по миру, $\Delta e = 1°$;

диапазон значений минимального угла места $\beta_{\text{мин}}$ НКА относительно потребителя $0° \le \beta_{\text{мин}} \le 90°$;

шаг расчета по минимальному углу места, $\Delta\beta = 1°$;

множество $\mathbf{O} = \{\mathbf{R}_n(T_0) |\ n = \overline{1, N_{\text{ОТ}}}\}$ векторов параметров движения НКА, находящихся в орбитальных точках ОГ с номерами n, заданных на момент времени T_0 и определяющих номинальную структуру ОГ НКА с общим количеством орбитальных точек ОГ $N_{\text{ОТ}}$;

множество $\mathbf{O}_i \subseteq \mathbf{O}$ структур ОГ НКА, отличающихся от номинальной структуры составом занятых орбитальных точек ОГ НКА, при ограничениях на общее количество НКА ($N_{\text{НКА}}$), определяющее работоспособное состояние навигационной системы.

количество вариантов структур ОГ НКА, I;

метод решения навигационной задачи – псевдодальномерный.

Определить:

для каждой структуры $\mathbf{O}_i \subseteq \mathbf{O}\ i = \overline{1, I}$ ОГ НКА относительную среднесуточную площадь земной поверхности $S_j^{\text{отн}}(\beta_m, \mathbf{O}_i, W_j)\ j = \overline{1, 3}$ для множества значений минимального угла места $\{\beta_m |\ \beta_m = m \cdot \Delta\beta, m = \overline{0, [90/\Delta\beta]}\}$ и трех значений критерия W_j:

$$W_j = \begin{cases} PDOP \le 6, & j = 1; \\ N^*_{\text{НКА}} < 4, & j = 2; \\ PDOP \ge 1000, & j = 3. \end{cases} \quad (1)$$

где $N^*_{\text{НКА}}$ – количество НКА, позволяющее решить навигационную задачу.

Допущение:

решение навигационной задачи – по всем видимым НКА.

Выбор исходных данных обусловлен значениями параметров радионавигационного поля ГЛОНАСС [2]. Кроме того, при значении $PDOP \ge 1000$ результат решения навигационной задачи по положению потребителя и составляющим вектора его скорости будет характеризоваться большими значениями случайных составляющих погрешностей оценок параметров движения потребителя.

Решение

Относительная среднесуточная площадь земной поверхности $S_j^{\text{отн}}(\beta_m, \mathbf{O}_i, W_j)$ рассчитывается по следующему алгоритму.

1. На каждый момент времени $T_k = T_0 + k \cdot \Delta t$ суточного интервала рассчитываются векторы $\mathbf{r}_{\text{НКА}}(T_k)$ положений НКА, входящих в номинальную структуру $\mathbf{O}$ ОГ НКА.

2. Для каждой структуры $\mathbf{O}_i \subseteq \mathbf{O}, i = \overline{1,I}$ на каждый момент времени T_k в каждом узле равномерной аналитической сетки по миру выполняются расчеты:

2.1. Из полученных значений векторов положений $\mathbf{r}_{\text{НКА}}(T_k)$ определяется количество $N^*_{\text{НКА}}$ НКА, пригодных к использованию на углах места равных или превышающих β_m, и значение позиционного фактора снижения точности *PDOP*.

2.2. Проверяется выполнение каждого заданного критерия W_j.

3. Для каждой структуры $\mathbf{O}_i \subseteq \mathbf{O}, i = \overline{1,I}$ и для каждого заданного критерия W_j на каждый момент времени определяется количество узлов сетки, для которых выполнен критерий W_j.

4. Для каждой структуры $\mathbf{O}_i \subseteq \mathbf{O}, i = \overline{1,I}$ и для каждого заданного критерия W_j рассчитывается относительная среднесуточная площадь земной поверхности $S_j^{\text{отн}}(\beta_m, \mathbf{O}_i, W_j)$ как среднее на суточном интервале количество узлов сетки, для которых выполнен критерий W_j.

Для расчета относительной среднесуточной площади земной поверхности для заданных значений *PDOP* необходимо рассчитать значения позиционных факторов снижения точности с использованием выражения

$$\mathbf{C} = (\mathbf{H}^{\mathrm{T}}\mathbf{H})^{-1}, \tag{2}$$

где $\mathbf{C}$ – ковариационная матрица размерностью 4×4, элементами главной диагонали которой являются дисперсии оценок положения потребителя и временной поправки к шкале времени потребителя при определенных погрешностях измерений псевдодальностей;

$\mathbf{H}$ – матрица частных производных размерностью $N^*_{\text{НКА}} \times 4$, представляющая собой линеаризованный оператор, который устанавливает связь между измеряемыми и оцениваемыми параметрами движения потребителя [3–5].

Выражение (2) можно переписать в виде:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{H}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}\mathbf{H})^{-1}, \tag{3}$$

где $\mathbf{P}$ – матрица весовых коэффициентов размерностью $N^*_{\text{НКА}} \times N^*_{\text{НКА}}$, элементы главной диагонали которой равны единице, а остальные элементы – нулю.

Таким образом, матрица $\mathbf{C}$ характеризует быстро меняющиеся случайные составляющие погрешностей оценок положения потребителя и временной поправки к шкале времени потребителя при среднем квадратическом отклонении измеряемых псевдодальностей, равным один метр (при условии равной точности измерений, а также при отсутствии корреляции между погрешностями измерений псевдодальностей).

Позиционный фактор *PDOP* снижения точности для момента времени $T_k = T_0 + k \cdot \Delta t$ определяется выражением:

$$\sigma|\hat{\mathbf{r}}_{\text{п}}|(T_k) = [c_{11}(T_k) + c_{22}(T_k) + c_{33}(T_k)]^{1/2}, \tag{4}$$

где $\sigma|\hat{\mathbf{r}}_{\text{п}}|(T_k)$ – среднее квадратическое отклонение оценки положения потребителя в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат (АГЭСК) $O_aX_aY_aZ_a$.

Абсолютная геоцентрическая экваториальная система координат является реализацией небесной (инерциальной) системы координат, центр которой – центр масс Земли. Основной плоскостью АГЭСК является средний экватор Земли, фиксированный на стандартную эпоху *J2000.0*. Ось O_aX_a направлена в среднюю точку весеннего равноденствия, соответствующую стандартной эпохе. Ось O_aZ_a направлена в северный полюс мира. Ось O_aY_a дополняет систему до правой [6].

Для расчета матрицы **H** необходимо определить:

– значения положения потребителя в АГЭСК для момента времени T_k

$$\mathbf{r}_{\text{п}}(T_k) = \left|x(T_k, b, l, h)\middle|y(T_k, b, l, h)\middle|z(T_k, b, l, h)\right|^{\text{T}}, \tag{5}$$

где b, l, h – геодезические широта, долгота и высота потребителя соответственно;

x, y, z – проекции вектора положения потребителя на оси O_aX_a, O_aY, O_aZ_a АГЭСК соответственно.

(переход от геодезических координат к координатам в АГЭСК осуществляется на заданную эпоху с использованием выражений, приведенных в справочном документе [6] и ГОСТ [7]).

– положения НКА орбитальной группировки $\mathbf{O}_i$ в АГЭСК для момента времени T_k.

Расчет положения $\mathbf{r}_{\text{НКА}}$ НКА, входящих в структуру ОГ, осуществлялся путем численного интегрирования по времени t системы дифференциальных уравнений движения в околоземном космическом пространстве, представленной в виде выражения:

$$\frac{d^2\mathbf{r}_{\text{НКА}}}{dt} = \mathbf{A}_{\text{ГПЗ}}(t, \mathbf{r}_{\text{НКА}}) + \mathbf{A}_{\text{ПЛ}}(t, \mathbf{r}_{\text{НКА}}) + \mathbf{A}_{\text{ПС}}(t, \mathbf{r}_{\text{НКА}}), \tag{6}$$

где $\mathbf{A}_{\text{ГПЗ}}$ – вектор возмущающего ускорения, обусловленного аномальностью гравитационного поля Земли с учетом сферических гармоник разложения размерностью 36×36;

$\mathbf{A}_{\text{ПЛ}}$ – вектор возмущающего ускорения, обусловленного влиянием гравитационного притяжения Луны;

$\mathbf{A}_{\text{ПС}}$ – вектор возмущающего ускорения, обусловленного влиянием гравитационного притяжения Солнца.

С учетом того, что расчеты проводятся на суточном интервале для НКА с неизвестными пространственно-геометрическими и отражательно-излучательными характеристиками, для исключения отрицательного влияния на точность эфемерид факторы атмосферного торможения и давления солнечного излучения не учитываются.

В качестве метода численного интегрирования был выбран неявный одношаговый метод Эверхарта седьмого порядка точности [8]. Интегрирование осуществлялось с постоянным шагом интегрирования, равным 1 с в прямоугольных координатах в АГЭСК, заданной на стандартную эпоху *J2000.0.*

В качестве начальных условий для прогнозирования структуры ОГ НКА были выбраны параметры движения НКА ГЛОНАСС, полученные из двустрочных элементов формата *TLE* согласно модели *SGP4*/*SDP4*.

С учетом приведенных выше параметров модели движения и метода интегрирования совокупная методическая погрешность расчета положения НКА на суточном интервале составит не более 1 м [8].

Такое значение погрешности положения НКА является достаточным условием, удовлетворяющим требованиям по точности эфемерид НКА (погрешность не должна превышать значений 7 м вдоль орбиты и по бинормали, 1,5 м – по радиус-вектору) [2]. Отклонение драконического периода обращения НКА при этом не превысит 0,5 с, а максимальный уход НКА относительно идеальной орбитальной точки структуры ОГ не превысит значения 1°, что соответствует допустимому диапазону значений эксплуатационных характеристик ГЛОНАСС.

Тогда относительную среднесуточную площадь земной поверхности для заданных критериев можно вычислить по формуле

$$S_j^{\text{отн}}(\mathbf{O}_i, W_j, \beta_m) = \frac{1}{K \cdot E} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{e=1}^{E} U\left[W_j(T_k, \mathbf{O}_i, W_j, \beta_m, e)\right], \quad (7)$$

где T_k – момент времени, $T_k = T_0 + k \cdot \Delta t$;

K – количество шагов расчетов по времени, $K = \lfloor (T - T_0/\Delta t) \rfloor$;

E – количество ячеек равномерной аналитической сетки, $E = 64800/\Delta e$;

U – мгновенный коэффициент, значение которого определяется критерием $W_j, U \in \{0,1\}$.

Значение коэффициента U определяется по следующему правилу:

$$U\left[W_j(T_k, \mathbf{O}_i, W_j, \beta_m, e)\right] = \begin{cases} 1, \text{если критерий } W_j \text{ выполнен;} \\ 0, \text{если критерий } W_j \text{ не выполнен.} \end{cases} \quad (8)$$

Таким образом, определяемая с использованием выражения (7) относительная среднесуточная площадь земной поверхности для заданных критериев не противоречит требованиям к методу измерения рабочей зоны ГЛОНАСС и является более информативным показателем качества системы, так как учитывает дополнительные факторы, влияющие на эффективность функционирования ГЛОНАСС.

Расчетный пример

Апробация разработанной методики проводилась для четырех структур ОГ НКА, $\mathbf{O}_i \subseteq \mathbf{O}$, $i = \overline{1,I}$, $I = 4$, таких что:

$\mathbf{O}_1 = \mathbf{O}$ – номинальная структура (количество НКА $N_{\text{НКА}} = 24$);

$\mathbf{O}_2 = \mathbf{O} \backslash \{\mathbf{R}_n(T_0) | n = 1\}$ – исключен первый НКА первой орбитальной плоскости ($N_{\text{НКА}} = 23$);

$\mathbf{O}_3 = \mathbf{O} \backslash \{\mathbf{R}_n(T_0) | n = 1, 9\}$ – исключены первые НКА первой и второй орбитальных плоскостей ($N_{\text{НКА}} = 22$);

$\mathbf{O}_4 = \mathbf{O} \backslash \{\mathbf{R}_n(T_0) | n = 1, 9, 17\}$ – исключены первые НКА первой, второй и третьей орбитальных плоскостей ($N_{\text{НКА}} = 21$).

На основе приведенных выше исходных данных произведены расчеты относительных среднесуточных площадей земной поверхности при всех значениях минимального угла места β_m для четырех структур $\mathbf{O}_i$ ОГ НКА с учетом трех критериев решения навигационной задачи W_j.

На рис. 1–3 представлены результаты расчета $S_j^{\text{отн}}(\mathbf{O}_i, W_j, \beta_m)$.

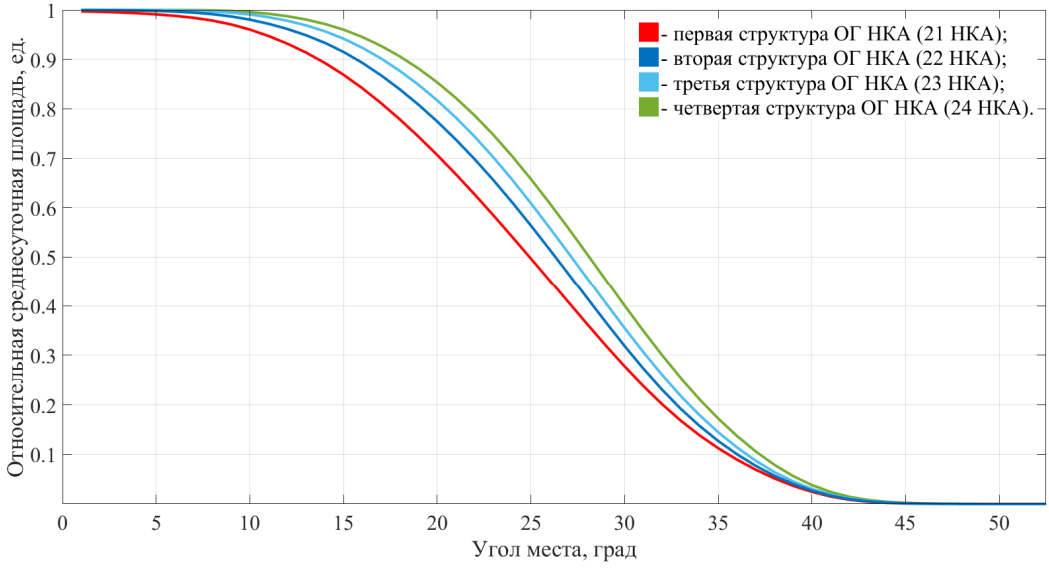


Рис. 1. Функциональные зависимости относительной среднесуточной площади земной поверхности от угла места и структуры ОГ НКА (критерий – $PDOP \leq 6$)

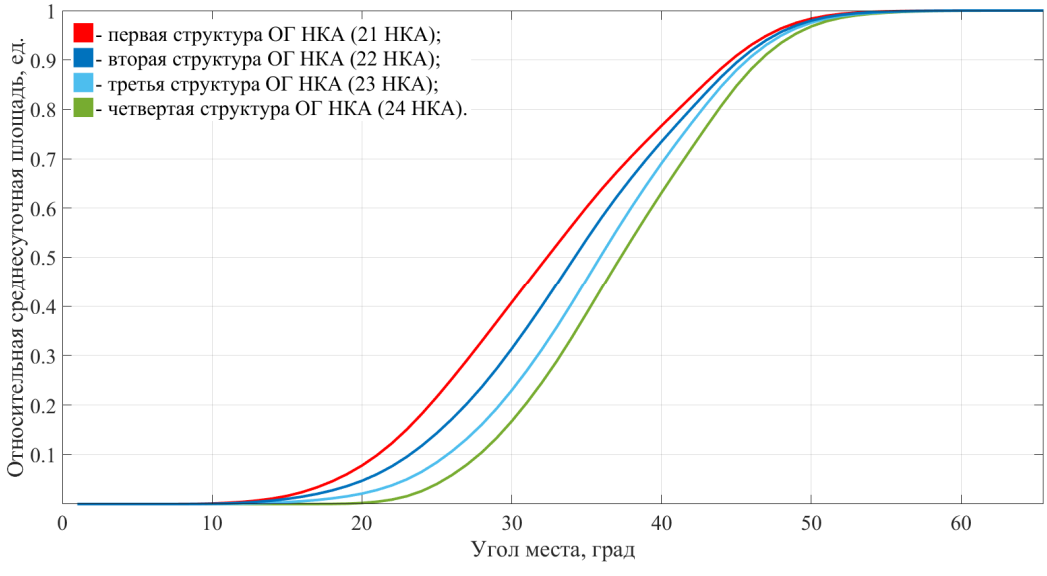


Рис. 2. Функциональные зависимости относительной среднесуточной площади земной поверхности от угла места и структуры ОГ НКА (критерий – $N^*_{\text{НКА}} < 4$)

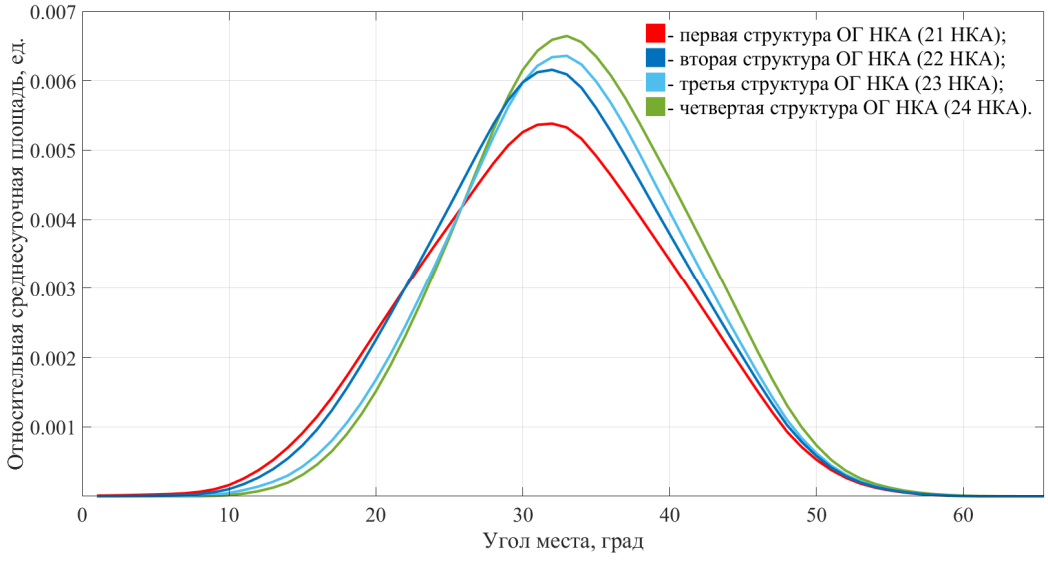


Рис. 3. Функциональные зависимости относительной среднесуточной площади земной поверхности от угла места и структуры ОГ НКА (критерий – *PDOP* ≥ 1000)

Таким образом, результаты анализа влияния структуры ОГ НКА и условий решения навигационной задачи на точность и возможность решения навигационной задачи псевдодальномерным методом позволяют сделать вывод о том, что структура ОГ НКА, отличная от номинальной, влияет:

– существенно на точность решения навигационной задачи (расхождения по углу места до 5° при равных относительных среднесуточных площадях земной поверхности для первого критерия);

– существенно на возможность решения навигационной задачи (расхождения по углу места до 10° при равных относительных среднесуточных площадях земной поверхности для второго критерия);

– незначительно на относительную среднесуточную площадь земной поверхности для третьего критерия (расхождения по относительной среднесуточной площади не более 0,001 при равных углах места).

Заключение

Обобщая вышеизложенное, при выведении на техническое обслуживание НКА необходимо учитывать влияние структуры ОГ НКА на качество навигации, т. е. необходимо предусмотреть выведение резервных НКА в орбитальные точки, в наибольшей степени ухудшающие доступность радионавигационного поля для потребителя.

Поскольку результаты анализа влияния структуры ОГ НКА показывают, что наибольшее влияние на эффективность решения навигационной задачи оказывает значение угла места НКА относительно потребителя, то целесообразно провести исследования в области статистического анализа реальных теневых условий получения навигационного сигнала для различных районов земной поверхности.

В настоящей статье рассмотрены только четыре варианта из возможных 2324 структур ОГ НКА [9], при $N_{\text{ОТ}} = 24$ и $N_{\text{НКА}} \geq 21$, поэтому дальнейшие исследования

могут проводиться в направлении анализа влияния других структур ОГ НКА для $N_{НКА} \geq 21$ на точность и возможность решения навигационной задачи псевдодальномерным способом [1].

Оценивание точности решения навигационной задачи по третьему критерию проводилось по всей площади земной поверхности, однако представляется важным в дальнейших исследованиях рассмотреть локальные районы земной поверхности в интересах разработки способов повышения точности навигации в этих районах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса ГЛОНАСС. – Королев: ЦНИИмаш, 2019. – 59 с.
2. ГОСТ 32454-2013 Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2014. – 15 с.
3. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
4. Мудров В. И., Кушко В. Л. Методы обработки измерений. – М.: Радио и связь, 1983. – 303 с.
5. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных / под ред. П. А. Агаджанова, В. Е. Дулевича, А. А. Коростелева. – М.: Сов. радио, 1969. – 411 с.
6. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ. – М.: 27 ЦНИИ Минобороны России, 2014. – 52 с.
7. ГОСТ 32453-2017 Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2017. – 20 с.
8. Бордовицина Т. В. Современные численные методы в задачах небесной динамики. – М.: Наука, 1984. – 136 с.
9. Стенли Р. Перечислительная комбинаторика. – М.: Мир, 1990. – 440 с.

METHODOLOGY FOR EVALUATING THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF THE ORBITAL GROUPING OF SPACECRAFT ON THE EFFICIENCY OF SOLVING THE NAVIGATION PROBLEM BY THE PSEUDO-LONG-RANGE METHOD

K. A. Krupskiy, M. G. Kudinov, A. S. Shavin, A. B. Spesivtsev (A. F. Mozhaisky Military Space Academy)

The considers impact assessment of the structure of the orbital grouping of navigation spacecraft and their visibility conditions on the accuracy and possibility of solving the navigation problem by the a pseudo-long-range method. Recommendations are given for taking into account the influence of the structure of the orbital grouping of navigation spacecraft on the quality of navigation.

УДК 681.7

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ЛИНЕЙНЫМИ АКСЕЛЕРОМЕТРАМИ

П. И. МАЛЕЕВ (АО «ГНИНГИ»)

Известные способы измерения абсолютной угловой скорости с помощью только акселерометров предъявляют к последним чрезвычайно высокие требования, а потому до настоящего времени не реализуются. В статье рассмотрен предложенный автором способ измерения абсолютной угловой скорости на акселерометрах с требованиями, на порядки меньшими, к порогу их чувствительности.

Способы измерения абсолютной угловой скорости и угловых перемещений не с помощью гироскопов, а при помощи линейных акселерометров известны давно [1, 2]. Однако для обеспечения приемлемых точностей они требуют использования акселерометров с чрезвычайно высоким порогом чувствительности $(10^{-9} – 10^{-11})$ *g*. Создание же акселерометров с такой чувствительностью представляет серьезную проблему.

Нами показано, что снижение требований к порогу чувствительности акселерометров на порядки может быть достигнуто построением двойной дифференциальной схемы формирования выходного сигнала блока акселерометров, его двукратной модуляцией и работой в нуль-индикаторном режиме [3]. Суть способа и принцип работы такого устройства поясняет рис. 1.

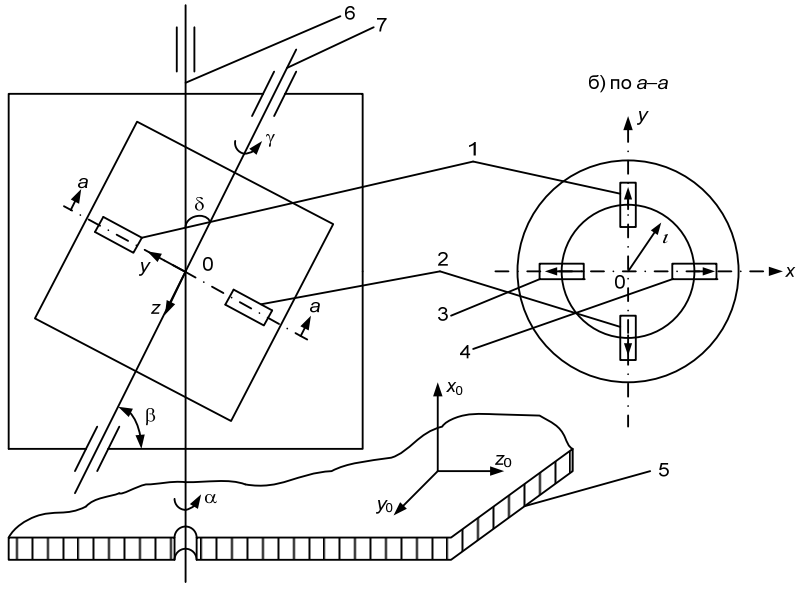


Рис. 1. Схема, поясняющая способ измерения абсолютной угловой скорости линейными акселерометрами (объяснения в тексте)

Две пары акселерометров 1 и 2, 3 и 4 со взаимно ортогональными осями чувствительности одновременно вращают вокруг пересекающихся внутренней 7 и внешней 6 осей карданова подвеса. Акселерометры размещаются симметрично на равном расстоянии l от внутренней оси r карданова подвеса в одной плоскости, перпендикулярно этой оси.

Согласно формуле Лагранжа выражение для силы инерции, регистрируемой одним из акселерометров, например, акселерометром 1, при плавном медленном вращении основания 5 (когда можно пренебречь составляющими сил инерции, представляющими собой квадратичные формы от абсолютной скорости основания), имеет вид:

$$
\begin{aligned}
F_{x_1} &= m\left(g_{y_o}\cos\alpha + g_{z_o}\sin\alpha\right)\sin\gamma + \\
&+ m\left[g_{x_o}\cos\beta + \left(g_{y_o}\sin\alpha - g_{z_o}\cos\alpha\right)\sin\beta\right]\cos\gamma - \\
&- ml_x\left\{\left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2\cos^2\beta + \right.\right. \\
&+ \left.\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\sin 2\beta\right]\sin^2\gamma - \\
&- \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\cos\alpha + \omega_{z_o}\sin\alpha\right)\cos\beta\cdot\sin 2\gamma + \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2\sin^2\beta - \\
&- \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\sin 2\beta + \\
&+ \left.2\dot{\gamma}\left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\sin\beta - \left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\cos\beta\right] + \dot{\gamma}^2\right\} \quad ,
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где α – угол поворота рамки подвеса вокруг внешней оси;

β – угол пересечения осей карданова подвеса;

γ – угол поворота блока акселерометров вокруг внутренней оси подвеса;

m – масса чувствительного элемента акселерометра;

$g_{x_o}, g_{y_o}, g_{z_o}$ – проекции кажущегося ускорения основания на оси жестко связанной с ним системы координат X0 Y0 Z0 (ось 0X0 направлена вдоль внешней оси подвеса);

$\omega_{x_o}, \omega_{y_o}, \omega_{z_o}$ – проекции на те же оси вектора абсолютной угловой скорости основания;

l – расстояние центра чувствительной массы акселерометра от внутренней оси подвеса.

Уравнение (1) получено при величинах угловых скоростей до приблизительно 10°/ч (~$0{,}5\cdot10^{-4}$ 1/с). В самом деле, при ω_{x_o}=10°/ч и скорости вращения $\dot{\alpha}$=10 1/с величина указанной помехи будет в 2000 раз меньше величины полезного сигнала.

Выражение для силы инерции второго акселерометра рассматриваемой пары может быть получено из уравнения (1), если в нем вместо γ подставить

$$(\gamma + \pi). \tag{2}$$

В этом случае имеем:

$$\begin{aligned}
&F_{x_2} = -m\left(g_{y_o}\cos\alpha + g_{z_o}\sin\alpha\right)\sin\gamma - \\
&-m\left[g_{x_o}\cos\beta + \left(g_{y_o}\sin\alpha - g_{z_o}\cos\alpha\right)\sin\beta\right]\cos\gamma - \\
&-ml_x\left\{\left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2\cos^2\beta + \right.\right. \\
&\left.\left.+\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\sin 2\beta\right]\sin^2\gamma - \right. \\
&-\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\cos\alpha + \omega_{z_o}\sin\alpha\right)\cos\beta\cdot\sin 2\gamma + \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2\sin^2\beta - \\
&-\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\sin 2\beta + \\
&\left.+2\dot{\gamma}\left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\sin\beta - \left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\cos\beta\right] + \dot{\gamma}^2\right\} \quad .
\end{aligned} \tag{3}$$

Таким образом, сумма показаний первой пары акселерометров (с малым разбросом масштабных коэффициентов K_1 и K_2) в данном случае составит:

$$\begin{aligned}
&U_I = U_1 + U_2 = K_1F_{x_1} + K_2F_{x_2} \approx \Delta_1\left\{\left(g_{y_o}\cos\alpha + g_{z_o}\sin\alpha\right)\sin\gamma + \right. \\
&\left.+\left[g_{x_o}\cos\beta + \left(g_{y_o}\sin\alpha - g_{z_o}\cos\alpha\right)\sin\beta\right]\cos\gamma\right\} - \\
&-2ml_x\left\{\left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2\cos^2\beta + \right.\right. \\
&\left.\left.+\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\sin 2\beta\right]\sin^2\gamma - \right. \\
&-\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\cos\alpha + \omega_{z_o}\sin\alpha\right)\cos\beta\cdot\sin 2\gamma + \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2\sin^2\beta - \\
&-\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\sin 2\beta + \\
&\left.+2\dot{\gamma}\left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\sin\beta - \left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\cos\beta\right] + \dot{\gamma}^2\right\} \quad ,
\end{aligned} \tag{4}$$

где K_1 и K_2 – близкие по величине масштабные коэффициенты первого и второго акселерометра;

U_1 и U_2 – электрические сигналы на выходе акселерометров;

Δ_1 – малая величина разности масштабных коэффициентов.

Положив в уравнение (4) вместо γ формулу

$$\gamma + \frac{\pi}{2}, \tag{5}$$

получим выражение для выходного сигнала второй пары акселерометров.

$$\begin{aligned}
U_{II} \approx \Delta_2 \{ & \left(g_{y_o} \cos\alpha + g_{z_o} \sin\alpha\right)\cos\gamma - \\
& - \left[g_{x_o} \cos\beta + \left(g_{y_o} \sin\alpha - g_{z_o} \cos\alpha\right)\sin\beta\right]\sin\gamma\} - \\
& - 2ml_x \left\{\left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2 \cos^2\beta + \right.\right. \\
& \left.\left. + \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o} \sin\alpha - \omega_{z_o} \cos\alpha\right)\sin 2\beta\right]\cos^2\gamma + \right. \\
& + \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o} \cos\alpha + \omega_{z_o} \sin\alpha\right)\cos\beta \cdot \sin 2\gamma + \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2 \sin^2\beta - \\
& - \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o} \sin\alpha - \omega_{z_o} \cos\alpha\right)\sin 2\beta + \\
& \left. + 2\dot{\gamma}\left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\sin\beta - \left(\omega_{y_o} \sin\alpha - \omega_{z_o} \cos\alpha\right)\cos\beta\right] + \dot{\gamma}^2\right\} \quad .
\end{aligned} \tag{6}$$

Разность сигналов первой и второй пары акселерометров с точностью до разброса масштабных коэффициентов Δ акселерометров может быть представлена уравнением:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{K} U_{вых} = U_I - U_{II} = \Delta_1\left(g_{x_o}, g_{y_o}, g_{z_o}\right) - \Delta_2\left(g_{x_o}, g_{y_o}, g_{z_o}\right) - \\
& - 2ml_x \{ - \left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2 \cos^2\beta + \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o} \sin\alpha - \omega_{z_o} \cos\alpha\right)\sin 2\beta\right] \text{c} \\
& - 2\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o} \cos\alpha + \omega_{z_o} \sin\alpha\right)\cos\beta \cdot \sin 2\gamma\} \quad .
\end{aligned} \tag{7}$$

Отсюда следует, что в разностном сигнале $U_{вых}$ отсутствует ряд составляющих асинхронных помех:

$$\left\{\dot{\gamma}^2 - \left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\sin 2\beta + \right.$$
$$\left. +2\dot{\gamma}\left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\sin\beta - \left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\cos\beta\right]\right\}. \quad (8)$$

$$\text{Если } \beta = \frac{\pi}{2} - \delta, \quad (9)$$

то для малых $\delta\left(\delta < \pi/6\right)$ уравнение (8) можно упростить:

$$\frac{1}{U_{вых}} = \Delta_1\left(g_{x_o}, g_{y_o}, g_{z_o}\right) - \Delta_2\left(g_{x_o}, g_{y_o}, g_{z_o}\right) +$$
$$+2ml_x\left\{\left[\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2\delta^2 + 2\delta\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\sin\alpha - \omega_{z_o}\cos\alpha\right)\right]\cos 2\gamma - \right. \quad (10)$$
$$\left. -2\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left(\omega_{y_o}\cos\alpha + \omega_{z_o}\sin\alpha\right)\delta\cdot\sin 2\gamma\right\}$$

или

$$U_{вых} = 4ml_x\left\{\frac{1}{2}\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)^2\delta^2\cos^2\gamma + \delta\left(\omega_{x_o} + \dot{\alpha}\right)\left[\omega_{y_o}\sin(\alpha - 2\gamma) - \right.\right.$$
$$\left.\left. - \omega_{z_o}\cos(\alpha - 2\gamma)\right]\right\} + \Delta_1\left\{\left(g_{y_o}\cos\alpha + g_{z_o}\sin\alpha\right)\sin\gamma + \right. \quad (11)$$
$$\left. + \left[g_{x_o}\delta + \left(g_{y_o}\sin\alpha - g_{z_o}\cos\alpha\right)\right]\cos\gamma\right\} + \Delta_2\left\{\left(g_{y_o}\cos\alpha + g_{z_o}\sin\alpha\right)\cos\gamma + \right.$$
$$\left. + \left[g_{x_o}\delta + \left(g_{y_o}\sin\alpha - g_{z_o}\cos\alpha\right)\right]\sin\gamma\right\} \quad .$$

Из уравнения (11) видно, что в полезной составляющей результирующего выходного сигнала $U_{вых}$, представляющего собой разность суммы сигналов первой и второй пары акселерометров

$$\frac{1}{K}U^*_{вых} = 4\delta ml_x\dot{\alpha}\left[\omega_{y_o}\sin\left(\alpha - 2\gamma\right) - \omega_{z_o}\cos\left(\alpha - 2\gamma\right)\right], \quad (12)$$

отсутствуют явно выраженные синхронные помехи, связанные с воздействием гравитационных полей, переносных ускорений и принудительного вращения.

Действительно, частота модуляции полезного сигнала $\left(\dot{\alpha}-2\dot{\gamma}\right)$ существенно отличается от частот модуляции помех $\dot{\gamma}$ и $\left(\dot{\alpha}\pm\dot{\gamma}\right)$, от переносных ускорений $\Delta_1\left(g_{x_o},g_{y_o},g_{z_o}\right)$ и $\Delta_2\left(g_{x_o},g_{y_o},g_{z_o}\right)$ и от принудительного вращения $\dot{\alpha}$ и $\dot{\gamma}$. Это обстоятельство указывает на то, что точность измерений не зависит от ориентации прибора в пространстве. При реально достижимых параметрах l = 10 см, δ = 0,275 рад (15°), $\dot{\alpha}$ = 10 1/с амплитуда регистрируемых акселерометрами Кориолисова ускорения, порождаемая абсолютной угловой скоростью поворота основания, составляет

$$a_m \approx 100\,\omega_{x_o} \text{ см/с}^2, \tag{13}$$

или при $\omega_{x_o} = 0{,}5\cdot10^{-8}$ (0,001 °/ч)

$$a_m = 0{,}5\cdot10^{-6} \text{ см/с}^2 \text{ или } 0{,}5\cdot10^{-9}g. \tag{14}$$

Регистрация колебаний с известной частотой и фазой при амплитудах порядка $0{,}5\cdot10^{-6}$ см/с^2 особой проблемы не представляет и может быть осуществлена при помощи акселерометров чувствительностью порядка $2\cdot10^{-5}g$. При этом погрешность, связанная с нестабильностью скоростей принудительного вращения $\left(\dot{\alpha},\dot{\gamma}\right)$, легко устраняется при использовании фазочувствительных детекторов, управляемых датчиками углов α и γ.

Существенно отметить также, что неявно выраженные помехи сигнала (12), связанные с нестабильностью параметров $\delta, l_x, \dot{\alpha}$, носят мультипликативный характер, что снимает особо жесткие требования к конструкции и приводу устройства при работе его в качестве датчика (нуль-индикатора) систем стабилизации платформы.

Для измерения результирующего выходного сигнала (12), несущего информацию о проекции вектора абсолютной угловой скорости на плоскость, и преобразования его в форму, пригодную для непосредственного использования в системе стабилизации и управления, могут быть использованы опорные напряжения вида:

$$\begin{aligned} U_{on} &= U_m \sin\left(\alpha - 2\gamma\right); \\ U_{on} &= U_m \cos\left(\alpha - 2\gamma\right), \end{aligned} \tag{15}$$

которые могут быть выработаны, например, при помощи соответствующих синусно-косинусных поворотных трансформаторов.

Рассматриваемый способ измерения абсолютной угловой скорости на основе линейных акселерометров по сравнению с предложенными ранее, имеет следующие преимущества:

1) уменьшаются требования к чувствительности акселерометров;

2) появляется возможность частотно-фазового выделения полезного сигнала на фоне помех, связанных с нестабильностью параметров акселерометров, дрейфом их нуля, изменением ориентации объекта относительно Земли и переносными ускорениями.

Дальнейшее улучшение технических характеристик датчика абсолютной угловой скорости, которое реализует рассмотренный способ, может быть обеспечено за счет введения в его схему опорного генератора и обеспечения обратной связи выходного устройства с системой вращения блока акселерометров вокруг внутренней оси (рис. 2)

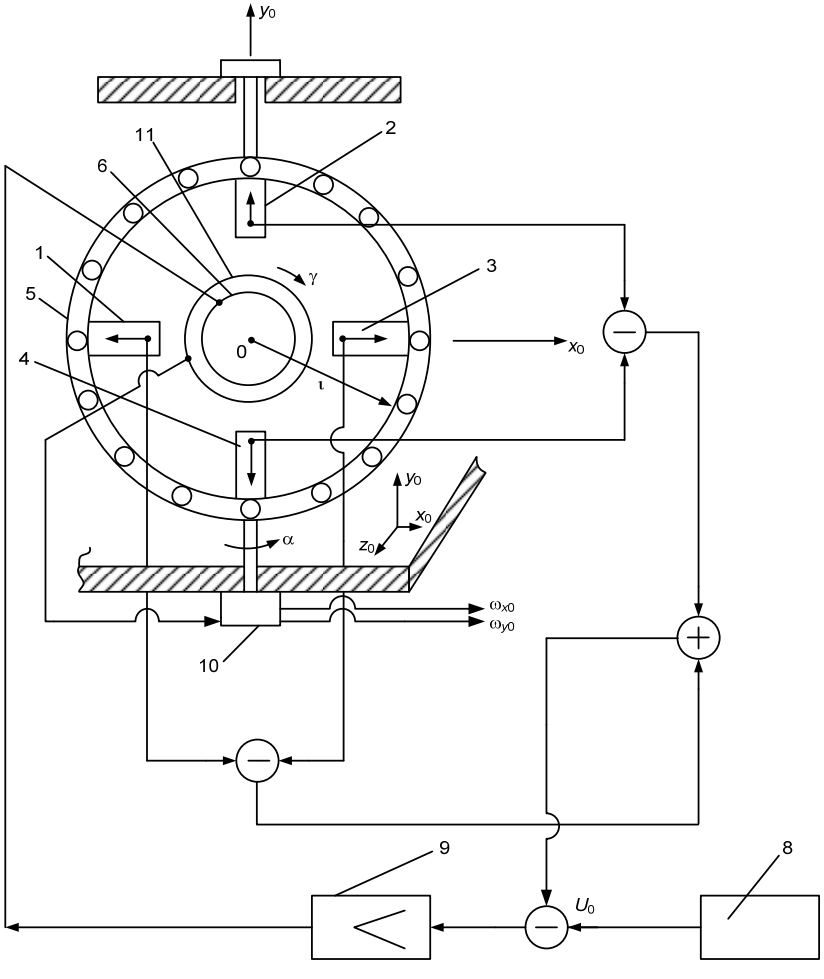


Рис. 2. Схема датчика абсолютной угловой скорости повышенной точности на акселерометрах (объяснения в тексте)

В отличие от рассмотренного ранее в этом датчике формируют разностные сигналы противолежащих акселерометров, суммируют эти разностные сигналы, сравнивают полученную сумму с эталонным сигналом U_o от эталонного генератора 8, а полученный результирующий сигнал после усиления в усилителе 9 подают на двигатель 6, обеспечивающий вращение блока акселерометров 5. При этом о величине абсолютной угловой скорости основания $\left(\omega_{x_o}, \omega_{y_o}\right)$ судят по величине относительной скорости вращения блока акселерометров вокруг внутренней оси, фиксируемой датчиком угла относительного поворота 10.

Проведя математические выкладки, аналогичные приведенным выше, можно показать, что в этом случае улучшается линейность зависимости выходной информации от измеряемой абсолютной угловой скорости и расширяется диапазон ее измерения, что позволяет использовать такие датчики при построении не только карданных, но и бескарданных инерциальных систем и систем курсоуказания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Ч. 1. Автономные системы. – М.: Наука, 1966. – 256 с.
2. Захарьин М. И., Захарьин Ф. М. Кинетика инерциальных систем навигации. М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.
3. Авторское свидетельство № 90211 (СССР). Способ измерения абсолютной угловой скорости / Малеев П. И., Голован А. А. Приоритет от 21.11.1974 г.

THE METHOD FOR MEASURING ABSOLUTE ANGULAR VELOCITY BY THE LINEAR ACCELEROMETERS

P. I. Maleev («GNINGI» JSC)

The known methods for measuring the absolute angular velocity using only accelerometers impose extremely high requirements on the latter and therefore have not been implemented to date. The article considers the proposed method for measuring the absolute angular velocity on accelerometers with requirements that are orders of magnitude lower to the threshold of their sensitivity.

УДК. 656.61.052:527.61:004.032.26

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В. В. ДЕРЯБИН
(ФГБОУ «ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова)

Предложена модель динамики судна в горизонтальной плоскости с тремя степенями свободы на основе нейронных сетей. В структуре модели несколько сетей. Выполнено обучение одной из сетей с использованием навигационного тренажёра. Результаты говорят в пользу работоспособности модели.

Введение

При решении ряда задач судовождения, например, управления движением судна, создания навигационных тренажёров, счисления пути (прогноз скорости дрейфа судна), фильтрации при прогнозировании кинематических параметров судна, их оценки при выходе из строя соответствующих датчиков приходится использовать ту или иную математическую модель его движения, в первую очередь, модель динамики. Эффективность решения таких задач напрямую зависит от адекватности используемой модели.

В качестве основы моделей динамики судна широко используются системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ДУ) [1–10]. Они имеют следующие недостатки. Во-первых, составленная система ДУ не является алгоритмом «гарантированной адекватности», так как силы рассчитываются на основе методов, никогда не учитывающих полностью все имеющиеся зависимости. Во-вторых, система ДУ не является универсальным алгоритмом, поскольку адекватность методов расчёта сил не может быть гарантирована для всех условий плавания. Если же использовать для разных условий различные методы, то возникает другая проблема – определения границ работоспособности указанных методов (моментов перехода от использования одного метода к другому), и не универсальный характер общего алгоритма полностью не исчезает.

Переход от ДУ к их дискретному (по времени) аналогу показывает, что задача определения кинематических параметров судна есть задача приближения (аппроксимации) функций многих переменных [11]. В качестве универсальных аппроксиматоров таких функций известны искусственные нейронные сети [12–14], что позволяет искать на их основе более адекватные и универсальные модели, чем на основе ДУ.

Идея использования нейронных сетей для решения различных задач судовождения не нова. Нейросетевые решения содержатся, например, в исследованиях [15–18]. Указанные и многие другие работы содержат, как правило, варианты использования нейронных сетей для решения частных задач моделирования движения, а обобщённая формулировка задачи моделирования в них отсутствует. Целью настоящей статьи является разработка обобщённой модели движения судна в горизонтальной плоскости на основе нейронных сетей.

1. Постановка задачи

Пусть *OXYZ* – геоцентрическая система координат, жёстко связанная с Землей, которую считаем инерциальной. Пусть *Gxyz* – система координат, жёстко связанная с судном. Точка *G* – центр инерции (масс) судна; ось *Gx* лежит в диаметральной плоскости, параллельна основной плоскости и направлена к носу; ось *Gy* перпендикулярна *Gx* и также параллельна основной плоскости, направлена в сторону правого борта; ось *Gz* дополняет систему до правой (направлена перпендикулярно вниз).

Считая оси системы координат *Gxyz* совпадающими с главными осями инерции, а также ограничиваясь только тремя степенями свободы, можно записать следующие дифференциальные уравнения [19]:

$$m\left(\frac{dV_x}{dt} + 0\cdot 0 - \omega V_y\right) = F_x,\ m\left(\frac{dV_y}{dt} + \omega\cdot V_x - 0\cdot 0\right) = F_y,$$

$$I_z\left(\frac{d\omega}{dt} + (I_y - I_x)\cdot 0\cdot 0\right) = M,$$

где m – масса судна; I_x, I_y, I_z – его моменты инерции вокруг соответствующих осей; V_x – продольная составляющая относительной скорости; V_y – поперечная составляющая относительной скорости (скорость дрейфа); ω – угловая скорость поворота вокруг вертикальной оси (скорость рыскания); F_x – проекция всех сил на продольную ось; F_y – проекция сил на поперечную ось; M – суммарный момент сил вокруг вертикальной оси.

На основе записанных выше соотношений, а также знаний из области теории судна (см., например, работу [11]) можно считать, что

$$\begin{aligned}
\frac{dV_x}{dt} &= f_1\left(V_x, V_y, \omega, p_{x1}, p_{x2}, ..., p_{xNx}\right),\\
\frac{dV_y}{dt} &= f_2\left(V_x, V_y, \omega, p_{y1}, p_{y2}, ..., p_{yNy}\right),\\
\frac{d\omega}{dt} &= f_3\left(V_x, V_y, \omega, p_{\omega 1}, p_{\omega 2}, ..., p_{\omega N\omega}\right),
\end{aligned} \qquad (1)$$

где f_1, f_2, f_3 – непрерывные функции, вид которых определяется физическими характеристиками судна; $p_{q1}, p_{q2}, ..., p_{qNq}$ (q = *x, y,* ω) – набор из N_q параметров, определяющих силовые воздействия на корпус судна.

Интегрированием (1) на промежутке времени [0; τ] получаем

$$\begin{aligned}
V_x(\tau) &= V_x(0) + \int_0^\tau f_1\left(V_x, V_y, \omega, p_{x1}, p_{x2}, ..., p_{xNx}\right)dt,\\
V_y(\tau) &= V_y(0) + \int_0^\tau f_2\left(V_x, V_y, \omega, p_{y1}, p_{y2}, ..., p_{yNy}\right)dt,
\end{aligned} \qquad (2)$$

$$\omega(\tau) = \omega(0) + \int_0^{\tau} f_3\left(V_x, V_y, \omega, p_{\omega 1}, p_{\omega 2}, ..., p_{\omega N \omega}\right) dt.$$

Разобьём отрезок [0; τ] дискретными равноотстоящими моментами времени $t_0 = 0, t_1, t_2, ..., t_n = \tau$ на n отрезков. Если дискретность (временной шаг) модели равна Δt, то, очевидно, $\tau = n \cdot \Delta t$. На основе дискретного варианта соотношений (2), получаем, что

$$V_x(\tau) \approx V_x(0) + f_x\left(\left\{V_x(t_i)\right\}_{i=0\div n}, \left\{V_y(t_i)\right\}_{i=0\div n}, \left\{\omega(t_i)\right\}_{i=0\div n}, \left\{p_{x1}(t_i)\right\}_{i=0\div n}, ..., \left\{p_{xNx}(t_i)\right\}_{i=0\div n}\right).$$

Аналогичные соотношения могут быть записаны для V_y и ω.

Введём следующее обозначение

$${}_n X_q = \left\{V_x(t_i)\right\}_{i=0\div n}, \left\{V_y(t_i)\right\}_{i=0\div n}, \left\{\omega(t_i)\right\}_{i=0\div n}, \left\{p_{q1}(t_i)\right\}_{i=0\div n}, ..., \left\{p_{qNq}(t_i)\right\}_{i=0\div n},$$

с учётом которого запишем:

$$\begin{aligned} V_x(t_n = \tau) &\approx V_x(0) + f_x\left({}_n X_x\right), \\ V_y(t_n = \tau) &\approx V_y(0) + f_y\left({}_n X_y\right), \\ \omega(t_n = \tau) &\approx \omega(0) + f_\omega\left({}_n X_\omega\right), \end{aligned} \qquad (3)$$

где f_x, f_y, f_ω – непрерывные функции, вид которых по-прежнему определяется физическими характеристиками судна.

Необходимо реализовать указанные выше функции в соотношениях (3) на основе нейронных сетей.

2. Архитектура нейронных сетей

Для нейросетевой реализации функций f_x, f_y, f_ω с любой точностью достаточно было бы использовать сеть прямого распространения с одним скрытым слоем и полными связями. Функции активации скрытого слоя такой сети должны быть не полиномами, а также локально интегрируемыми (по Риману). Нейрон выходного слоя имеет тождественную функцию активации. Таковы условия для универсальной аппроксимации сетей с одним скрытым слоем [14], т. е. мелких нейронных сетей (МС).

Основным недостатком МС является то, что для получения заданной точности приближения функции может потребоваться очень большое количество нейронов скрытого слоя [20]. Использованием глубокой архитектуры можно надеяться добиться той же точности приближения, но с меньшим общим количеством нейронов сети.

Как правило, полно связная глубокая сеть прямого распространения образуется из мелкой путём добавления скрытых слоев между первым скрытым слоем и

выходным, т. е. выход i-го слоя сети есть вход для i+1-го. Пусть $x_1, x_2, ..., x_k$ – набор аргументов функции k переменных $f(\cdot)$. Вектор $x_1, x_2, ..., x_k$ подаётся на первый слой такой полно связной глубокой сети, который преобразует его в вектор $f_1^1(x_1,...,x_k), f_2^1(x_1,...,x_k),..., f_{L_1}^1(x_1,...,x_k)$, где L_1 – количество нейронов первого слоя. Указанный вектор подаётся на второй слой, и получается вектор $f_1^2(x_1,...,x_k), f_2^2(x_1,...,x_k),..., f_{L_2}^2(x_1,...,x_k)$ и т. д. Можно надеяться, что удастся подобрать L_1, L_2 … так, что заданная точность аппроксимации достигается использованием меньшего числа нейронов по сравнению с МС. Следует заметить, что, начиная со второго скрытого слоя, его выход не формируется независимо. Действительно, значения, например, $f_1^2(x_1,...,x_k)$ и $f_2^2(x_1,...,x_k)$ зависят от одинаковых коэффициентов, так как сеть полносвязная. Это приводит к своеобразному ограничению на свободу вариации настраиваемых параметров сети, что может оказывать негативное влияние на точность аппроксимации.

В качестве решения указанной проблемы предлагается перейти к глубокой архитектуре каскадного типа. Входной вектор $x_1, x_2, ..., x_k$ одновременно поступает на вход N_1 мелких нейронных сетей (МС), каждая из которых выполняет своё преобразование $\widetilde{f}_1^1(x_1,...,x_k), \widetilde{f}_2^1(x_1,...,x_k),..., \widetilde{f}_{N_1}^1(x_1,...,x_k)$. Затем полученный вектор вновь подаётся на N_2 МС, в результате работы которых получается вектор $\widetilde{f}_1^2(x_1,...,x_k), \widetilde{f}_2^2(x_1,...,x_k),..., \widetilde{f}_{N_2}^2(x_1,...,x_k)$. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута последняя МС, на выходе которой снимается значение приближаемой функции $\widetilde{f}_1^L(x_1,...,x_k)$. Общий вид архитектуры такой глубокой нейронной сети (ГС) изображён на рис. 1. Получается, что ГС состоит из слоёв обычных МС, каждая из которых удовлетворяет условиям универсальной аппроксимации.

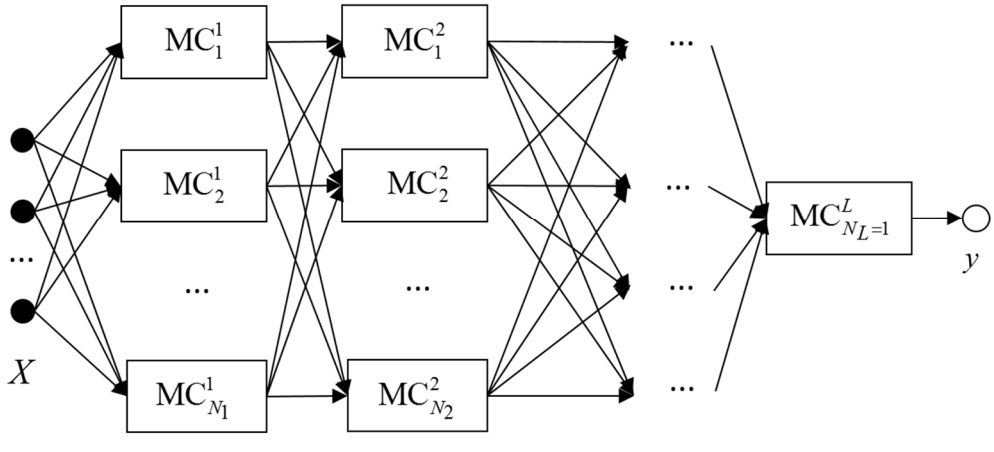


Рис. 1. Архитектура глубокой нейронной сети каскадного типа («МС» – «мелкая» нейронная сеть, *X* – входной вектор, *y* – выходная величина)

Архитектура ГС задаётся матрицей архитектуры А. Число строк А равно наибольшему значению количества МС в каком-либо слое. Число столбцов – это количество слоёв МС, т. е. L. Элементы матрицы архитектуры имеют вид $A_{ij} = \left(s_{ij},\ \text{тип и параметры ФА}_{ij}\right)$, где $i = 1 \div N_{j=1 \div L}, j = 1 \div L$, s_{ij} – число нейронов МС_i^j, ФА_{ij} – функция активации МС_i^j. Иногда вместо матрицы А уместно использовать сокращённую матрицу архитектуры $\widetilde{\text{A}}$ с элементами $\widetilde{A}_{ij} = \left(s_{ij}\right)$, а функции активации и их параметры характеризовать отдельно.

3. Архитектура нейросетевой модели движения судна

Функции f_x, f_y, f_ω в соотношениях (3) реализуются глубокими сетями (рис. 1). Будем их в дальнейшем называть *основными глубокими сетями* (ОГС), обозначая символом ОГС_q^n. Заметим, что если последний нейрон ОГС соединить с начальным значением скорости через постоянный вес, не корректируемый в процессе обучения, то ОГС будет прогнозировать скорость на конец промежутка [0; τ], а не приращение. В дальнейшем будем считать, что такая манипуляция с ОГС выполнена.

Функции f_x, f_y, f_ω, фигурирующие в выражении (3) и реализованные на основе ГС, могут вычисляться в различной последовательности. Например, можно рассчитать сначала f_x, потом f_y, а потом f_ω. Однако это не единственный вариант. Например, можно сначала вычислить f_ω, а затем f_y и f_x. Вообще порядок расчёта определяется вектором конфигурации $K = \left(k_1 \quad k_2 \quad k_3\right)$, каждый элемент которого принимает различное значение от 1 до 3. Например, $K = \left(1 \quad 2 \quad 3\right)$ означает, что сначала реализуется (используется) первое уравнение в выражении (3), затем второе, затем третье.

В зависимости от K будут отличия в формировании векторов ${}_nX_q$. При любой конфигурации возникнет ситуация, когда ${}_nX_q$ содержит величину, которая подлежит определению. Например, $f_y\left({}_nX_y\right)$ позволяет определить $V_y(\tau)$, но и входной вектор ${}_nX_y$ также содержит $V_y(\tau)$. В качестве выхода из ситуации можно использовать значение $\hat{V}_y(\tau)$, спрогнозированное на основе исторических данных $V_y(t)$. Задача прогноза временных рядов решается *вспомогательными глубокими сетями* (ВГС), также имеющими архитектуру, изображённую на рис. 1. Обозначение: $\text{ВГС}_q^{l_q}$, где $l_q \geq 1$ – число промежутков, значения на концах которых используются для прогноза.

В процессе работы модели при выбранном векторе конфигурации K реализуется итерационный процесс Пикара, т. е. вычисления функций f_x, f_y, f_ω при помощи ОГС повторяются несколько раз, пока модули разностей значений всех прогнозируемых величин для двух последовательных итерациях не будут одновременно меньше установленных значений $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_\omega$.

Уточним обозначения, V_x, V_y, ω – теоретические значения составляющих скорости; $V_x^{\text{neuro}}, V_y^{\text{neuro}}, \omega^{\text{neuro}}$ – значения составляющих скорости, спрогнозированные ОГС на *текущей* итерации; $\widetilde{V}_x^{\text{neuro}}, \widetilde{V}_y^{\text{neuro}}, \widetilde{\omega}^{\text{neuro}}$ – значения составляющих скорости, спрогнозированные ОГС на *предыдущей* итерации; $\hat{V}_x, \hat{V}_y, \hat{\omega}$ – значения, спрогнозированные ВГС.

Рассмотрим теперь, каким образом происходит формирование входных векторов ОГС ${}_nX_q$, например, для вектора конфигурации $K = (2 \quad 1 \quad 3)$.

Начальные значения прогнозируемых параметров определяются следующим образом.

$$V_x(0), V_y(0), \omega(0) = \begin{cases} V_x(T=0), V_y(T=0), \omega(T=0), \text{если } T/\tau = 1 \\ V_x^{\text{neuro}}(0), V_y^{\text{neuro}}(0), \omega^{\text{neuro}}(0), \text{если } T/\tau > 1, \end{cases}$$

где T – общее время движения судна.

$$\{V_x(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_x^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1},$$

$$\{V_y(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{V_y^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1},$$

$$\{\omega(t_i)\}_{i=1\div n-1} = \{\omega^{\text{neuro}}(t_i)\}_{i=1\div n-1}.$$

Для сети ОГС_y^n

Конечная продольная скорость $V_x(t_n = \tau)$. На первой итерации $V_x(\tau) = \hat{V}_x(\tau)$. На второй и последующих: $V_x(\tau) = \widetilde{V}_x^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. На первой итерации $V_y(\tau) = \hat{V}_y(\tau)$. На второй и последующих: $V_y(\tau) = \widetilde{V}_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная угловая скорость $\omega(t_n = \tau)$. На первой итерации $\omega(\tau) = \hat{\omega}(\tau)$. На второй и последующих: $\omega(\tau) = \widetilde{\omega}^{\text{neuro}}(\tau)$.

Для сети ОГС_x^n

Конечная продольная скорость $V_x(t_n = \tau)$. На первой итерации $V_x(\tau) = \hat{V}_x(\tau)$. На второй и последующих: $V_x(\tau) = \widetilde{V}_x^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau)$. Берётся с выхода ОГС_y^n на текущей итерации, т. е. $V_y(\tau) = V_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная угловая скорость $\omega(t_n = \tau)$. На первой итерации $\omega(\tau) = \hat{\omega}(\tau)$. На второй и последующих: $\omega(\tau) = \tilde{\omega}^{\text{neuro}}(\tau)$.

Для сети ОГС_{ω}^{n}

Конечная продольная скорость $V_x(t_n = \tau) = V_x^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная поперечная скорость $V_y(t_n = \tau) = V_y^{\text{neuro}}(\tau)$.

Конечная угловая скорость $\omega(t_n = \tau)$. На первой итерации $\omega(\tau) = \hat{\omega}(\tau)$. На второй и последующих: $\omega(\tau) = \tilde{\omega}^{\text{neuro}}(\tau)$.

3.1 Параметры архитектуры модели

Могут быть перечислены в виде нижеследующего списка:

1. Вектор конфигурации *K*.
2. Ограничения по итерациям $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_\omega$.
3. Длина промежутка [0; τ] и число промежутков, его формирующих *n*.
4. Матрицы архитектуры ОГС $\text{A}_{\text{ОГС}_x^i}, \text{A}_{\text{ОГС}_y^i}, \text{A}_{\text{ОГС}_\omega^i}$, где $i = 1 \div n$, либо их сокращённые версии с характеристиками функций активации скрытых слоёв МС.
5. Матрицы архитектуры ВГС $\text{A}_{\text{ВГС}_x^{l_x}}, \text{A}_{\text{ВГС}_y^{l_y}}, \text{A}_{\text{ВГС}_\omega^{l_\omega}}$, либо их сокращённые версии с характеристиками функций активации скрытых слоёв МС.
6. Величины l_x, l_y, l_ω для определения количества точек, используемых для прогнозирования временных рядов.
7. Наборы параметров $p_{q1}, p_{q2}, ..., p_{qNq}$ ($q = x, y, \omega$), характеризующих силовые воздействия на корпус судна.

4. Алгоритм работы нейросетевой модели движения судна

1. Задание параметров архитектуры.
2. Определение значений $V_x(\tau), V_y(\tau), \omega(\tau)$ для конца [0; τ] на основе ОГС в результате последовательности следующих действий:

2.1. Прогноз ОГС_q^1 значений на момент t_1.

2.2. Прогноз ОГС_q^2 значений на момент t_2.

……..

2.*n*. Прогноз ОГС_q^n значений на момент $t_n = \tau$.

3. Изменение границ [0; τ] на один шаг Δ*t* вперёд. Переход к п.2.*n*

В ходе выполнения шагов 2.1, 2.2, …, 2.*n* реализуется итерационный процесс Пикара до удовлетворения требованиям по итерационным ограничениям $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_\omega$. Входные вектора ОГС ${}_nX_q$ формируются в соответствии с вектором конфигурации *K*, определяющим, в частности, и работу ВГС.

5. Экспериментальная часть

Для проверки работоспособности модели необходимо выполнить её настройку (обучение). Ограничимся пока лишь настройкой части модели, а именно сети ОГС, прогнозирующей скорость дрейфа $V_y(\tau)$. Значение τ = 1 с. Значение n = 1. Т. е. Δt = 1 с. Сокращённая матрица архитектуры $\widetilde{\mathrm{A}}_{\mathrm{ОГС}_y^1} = \begin{pmatrix} 30 & 30 \\ 30 & 0 \end{pmatrix}$. В качестве функций активации скрытых нейронов МС используется гиперболический тангенс, т. е. функция вида $\mathrm{th}\, x = 2/(1+\exp(-2x)) - 1$.

Параметры $p_{q1}, p_{q2}, ..., p_{qNq} = n_r, \delta, V_R, \alpha_R, h, \gamma, \lambda$, где n_r – частота вращения винта, δ – угол перекладки руля, V_R – скорость относительного ветра, α_R – курсовой угол относительного ветра, h – высота волны, γ – курсовой угол волны, λ – длина волны.

В качестве источника получения образцов для настройки $\mathrm{ОГС}_y^1$ использовался навигационный тренажёр «Navi-Trainer 5000» (вер. 5.30), установленный в Морском учебно-тренажёрном центре Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Использовалась модель балкера массовым водоизмещением 23565 т. Были заданы четыре маршрута, направления которых составляли 0, 90, 180 и 270°. По каждому из этих маршрутов выполнялась автоматическая стабилизация судна в течение 8 часов плавания. Стабилизация повторялась 10 раз с различными гидрометеорологическими условиями плавания. Были рассмотрены случаи северного ветра, скорость которого варьировала от 0 до 9 баллов по шкале Бофорта. Параметры каждой ситуации были записаны с дискретностью 1 с в CSV-файл. Таким образом, набор учебных данных может быть сформирован на основе 40 восьмичасовых плаваний судна.

Далее была сформирована последовательность входного вектора ${}_{n=1}X_y$, четвёртая координата которого представляет к тому же $V_y(\tau)$, т. е. выходной сигнал сети. Всего было получено 1152000 значений ${}_{n=1}X_y$.

Разумно предположить, что среди указанных значений входного вектора есть очень близкие, похожие образцы, и сгруппированы они в какой-то узкой области пространства компонент ${}_{n=1}X_y$. В связи с этим возникает задача предварительной обработки входных данных, в основу которой положена *классификация* образцов. Классификатор работает на следующих принципах:

1. Для снижения размерности выполняется переход от вектора ${}_1X_y$ к среднему вектору ${}_1\overline{X}_y$. Такой вектор содержит вместо однородных компонент их средние арифметические значения. Например, вместо первых двух компонент $V_x(0), V_x(\tau)$ берётся $\overline{V}_x = (V_x(0) + V_x(\tau))/2$. Таким образом, размерность ${}_1\overline{X}_y$ уже равна 10. Обобщение может быть сделано и для случая $n > 1$, т.е. для вектора ${}_nX_y$.

2. Задаются границы возможных значений компонент ${}_1\overline{X}_y$: $\min(\overline{V}_x) = -1$ уз. (1 узел (уз.) = 1 морской миле в час, т. е. 1852 м/ч), $\max(\overline{V}_x) = 20$ уз., $\min(\overline{V}_y) = -7$ уз., $\max(\overline{V}_y) = 7$ уз., $\min(\overline{\omega}) = -180°/\text{мин.}$, $\max(\overline{\omega}) = 180°/\text{мин.}$, $\min(\overline{n}_r) = 0$, $\max(\overline{n}_r) = 130\,\text{мин.}^{-1}$, $\min(\overline{\delta}) = -35°$, $\max(\overline{\delta}) = 35°$, $\min(\overline{V}_R) = 0$, $\max(\overline{V}_R) = 35$ м/с, $\min(\overline{\alpha}_R) = 0$, $\max(\overline{\alpha}_R) = 360°$, $\min(\overline{h}) = 0$, $\max(\overline{h}) = 11$ м, $\min(\overline{\gamma}) = -180°$, $\max(\overline{\gamma}) = 180°$; $\min(\overline{\lambda}) = h_S \cdot (1/h_\lambda_{\max})$, где $h_S = 0.5$ м, $h_\lambda_{\max} = 1/10$; $\max(\overline{\lambda}) = \max(\overline{h}) \cdot (1/h_\lambda_{\min})$, где $h_\lambda_{\min} = 1/50$.

3. Задаются количества внутренних точек, делящих область значений каждой компоненты ${}_1\overline{X}_y$ на равные отрезки: $q_\overline{V}_x = 2$, $q_\overline{V}_y = 1$, $q_\overline{\omega} = 2$, $q_\overline{n}_r = 1$, $q_\overline{\delta} = 3$, $q_\overline{V}_R = 2$, $q_\overline{\alpha}_R = 3$, $q_\overline{h} = 2$, $q_\overline{\gamma} = 3$, $q_\overline{\lambda} = 3$.

4. На основе пп. 2 и 3 формируются векторы дискретных значений компонент ${}_1\overline{X}_y$.

5. Реализуются вложенные циклы по всем компонентам данных векторов (с учётом ограничений $h_\lambda_{\min}$, $h_\lambda_{\max}$), формируется множество опорных (узловых) точек для настройки сети (коррекции её параметров).

6. На основе векторов дискретных значений п. 4, формируются векторы средних арифметических их компонент, т. е. векторы промежуточных значений.

7. Реализуются вложенные циклы по всем компонентам данных векторов (с учётом ограничений $h_\lambda_{\min}$, $h_\lambda_{\max}$), формируется множество опорных точек для контроля обобщающих свойств сети в процессе настройки.

8. Ближайший (по расстоянию Евклида) к опорной точке текущий вектор ${}_1X_y$ соотносится с классом, соответствующим данной точке (обучающей или контрольной).

9. Задаётся максимальное допустимое количество образцов в каждом обучающем классе N_{tr} и контрольном классе N_{val}, а также процент от половины шага для каждой компоненты $p_{\text{step/2}}$, необходимый для обеспечения локализации образцов в окрестности опорных точек. При $p_{\text{step/2}} = 1$ образцы могут быть в любой точке области действия класса.

Приведённый способ классификации был реализован с параметрами $N_{\text{tr}} = N_{\text{val}} = 100$ и $p_{\text{step/2}} = 1$. Получено 8127 образцов для настройки и 9878 – для контроля, что составляет всего 1,6 % от общего количества образцов.

Для обучения нейронной сети использовался метод стохастического градиента в рамках процедуры рестарта. На каждой итерации рестарта (всего 100) параметры сети (веса и пороги) инициализируются случайными значениями из промежутка от –1 до +1. Далее работает адаптивное «дельта-правило» с начальным параметром скорости обучения $lr := lr_0 = 0{,}01$. После каждого рассмотрения всех образцов обучающей выборки (эпохи) $lr = lr \cdot lr_{\text{inc}}$, если значение функции ошибки E

(половина среднего квадрата погрешности сети на контрольной выборке) уменьшается; и $lr = lr \cdot lr_{\text{dec}}$ – в противном случае. $lr_{\text{inc}} = 1{,}1$, $lr_{\text{dec}} = 0{,}9$. Если после 100 последовательных «прохождений» по обучающей выборке значение E не уменьшается, то обучение останавливается и выполняется переход к следующей итерации рестарта с $lr := lr_0$. Конечно, в процессе обучения лучшее (минимальное по E) состояние сети сохраняется на жёсткий диск.

Создание архитектуры, обработка данных для формирования учебного набора, их классификация, а также настройка сети выполнялись в программной среде MATLAB R2019a.

В результате обучения было установлено, что (для контрольной выборки) наибольшая ошибка прогноза поперечной скорости составляет (по модулю) 1,93 уз. (≈ 0,99 м/с), её средний модуль – 0,25 уз. (≈ 0,13 м/с). При этом для формирования входного сигнала вместо $V_y(\tau)$ использовалось предыдущее значение $V_y(0)$.

Заключение

Предложена модель движения судна с тремя степенями свободы на основе нейронных сетей. Основу модели составляют глубокие сети, полученные каскадным соединением мелких нейронных сетей, обладающих свойствами универсальной аппроксимации. Результаты компьютерного эксперимента с использованием навигационного тренажёра показали, что предлагаемые глубокие сети могут быть настроены по результатам данных, накопленных в процессе повседневной эксплуатации судна. Сеть, прогнозирующая скорость дрейфа судна, имеет удовлетворительную среднюю точность. Невысокая точность может быть объяснена невозможностью использования ВГС, так как образцы контрольной выборки представляют собой независимые наборы данных. Возможно, в ходе реального тестирования, точность модели будет больше. Дальнейшие исследования могут выполняться в области разработки оптимальных (по точности) архитектуры предлагаемой нейросетевой модели, методов формирования учебных данных и настройки, а также надёжных алгоритмов её тестирования.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам Морского учебно-тренажёрного центра Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова Игорю Валентиновичу Шрамко и Виктору Валентиновичу Кондратьеву за организационно-техническую поддержку экспериментальной части исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асланов Г. К., Абдулаева З. М.. Моделирование влияния мелководья на гидродинамические коэффициенты при уравнениях гидродинамики судна // Вестник ДГТУ. Техн. Науки. – 2011. – № 22. С. 54–58.
2. Дерябин В. В. Модель движения судна в горизонтальной плоскости // Транспортное дело России. – 2013. – № 6. С. 60–67.
3. Юдин Ю. И., Пашенцев С. В., Жабижа Б. В., Петров С. О. Идентификация математической модели контейнеровоза проекта Arctic Container Ship ACS 650 для различных этапов швартовки // Эксплуатация морского транспорта. – 2019. – № 3. – С. 89–107.

4. Пилюгин А. Г. Математическая модель движения судна на установившейся циркуляции // Морской вестник. – 2014. – № 1(49). С. 111.
5. Семенова В. Ю., Голуб В. А. Использование модифицированного метода интегральных уравнений для определения нелинейных сил, возникающих при качке судна на мелководье // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – Т. 1. – № 4(38). – С. 46–55.
6. Токарев П. Н. Математическая модель произвольного движения и маневрирования судна // Вестник ВГАВТ. – 2018. – Вып. 56. – С. 198–214.
7. Chillcce G., Moctar O. A numerical method for manoeuvring simulation in regular waves // Ocean Engineering. – 2018. – Vol. 170. – P. 434–444.
8. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. – Chichester. John Wiley & Sons, 2011, XVIII. – 575 p.
9. Huang H. R., Wang Y. L. Simulation of ship maneuvering using the plane motion model // Indian journal of geo-marine sciences. – 2017. – Vol. 46. – № 11. – P. 2250–2257.
10. Zhang B. J. Jie L., Ning X., Wen-Xuan S. Numerical Simulation of Ship Motions in Regular and Irregular Waves // Marine technology society journal. – 2019. – Vol. 53. – № 1. – P. 97–106.
11. Дерябин В. В. Использование нейронных сетей для стабилизации судна на траектории // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2018. – Т. 10. – № 4. – С. 665–678.
12. Bianchini M., Maggini M., Jain L. C. (Eds.). Handbook on neural information processing. – NY. Springer, 2013, XX. – 538 p.
13. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines: Third Edition. – NY. Prentice Hall, 2009, XXX. – 906 p.
14. Hornik K.. Some new results on neural network approximation // Neural Networks. – 1993. – Vol. 6. – № 8. – P. 1069–1072.
15. Deryabin V. V., Sazonov A. E. A Vessel's Dead Reckoning Position Estimation by Using of Neural Networks // Advances in Intelligent Systems and Computing: Proceedings of the Third International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI, 18). – 2019. – Vol. 1. – P. 493–502.
16. Kula K. S. Model-based controller for ship track-keeping using neural network // 2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF). – Piscataway. IEEE, 2015. – P. 178–183.
17. Margari V., Kanellopoulou A., Zaraphonitis G. On the use of artificial neural networks for the calm water resistance prediction of MARAD systematic series' hull forms // Ocean Engineering. – 2018. – Vol. 165. – P. 528–537.
18. Oskin D.A., Dyda A.A., Markin V.E. Neural Network Identification of Marine Ship Dynamics // 9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems. CAMS 2013. – NY. Springer, 2014. – P. 191–196.
19. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.. Теоретическая физика. Том 1. Механика. – М.: Наука, 1988. – 216 с.
20. Pinkus A. Approximation theory of the MLP model in neural networks // Acta Numerica. – 1999. – Vol. 8. – P. 143–195.

SHIP MOTION MODEL BASED ON NEURAL NETWORKS

V. V. Deryabin (Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping)

A model of ship dynamics in a horizontal plane with three degrees of freedom based on neural networks is proposed. There are several networks in the model structure. Training of one of the networks has been performed with the use of a navigational simulator. The results are in favor of the working ability of the model.

УДК 658.5

ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА НА ОДНИХ ЛИШЬ АКСЕЛЕРОМЕТРАХ

П. И. МАЛЕЕВ (АО «ГНИНГИ»)

Схемы инерциальных навигационных систем (ИНС) на одних лишь акселерометрах (без гироскопов) известны давно. Однако реализовать их из-за чрезвычайно высоких требований к акселерометрам не представляется возможным. Предложенный нами датчик абсолютной угловой скорости на акселерометрах позволяет решить эту проблему. Рассмотренная ниже схема такой ИНС использует акселерометры с уже достигнутым порогом чувствительности, что обеспечивает высокую степень унификации ее основных элементов, их меньшие по сравнению с гироскопами массогабаритные характеристики и стоимость, а также большую простоту в изготовлении.

Основными элементами инерциальных навигационных систем (ИНС) являются гироскопы, измеряющие угловые ускорения, и акселерометры, измеряющие линейные перемещения. Попытки создания ИНС на одних лишь линейных акселерометрах предпринимались неоднократно [1, 2]. Однако для реализации предложенных схем таких ИНС, обладающих той же точностью, что и обычные ИНС, необходимо использовать акселерометры с порогом чувствительности (10^{-9} – 10^{-11}) g, что на несколько порядков ниже достигнутой в настоящее время.

Использование в ИНС предложенного нами датчика абсолютной угловой скорости на линейных акселерометрах [3] значительно снижает требования к акселерометрам. Задача создания ИНС на одних лишь акселерометрах становится реализуемой. Принципиальная схема ИНС на одних лишь линейных акселерометрах приведена на рисунке.

Она содержит два описанных ранее [3] акселерометрических датчика абсолютной угловой скорости, устанавливаемых на объекте во взаимно ортогональных плоскостях (показаны пунктиром I и II). Каждый из этих датчиков приводится во вращение с постоянной угловой скоростью $\dot{\alpha}$ вокруг внешних взаимно ортогональных осей $0X_0$ и $0Z_0$. Показания датчиков в процессе последовательных преобразований обеспечивают определение угловой скорости объекта, его кажущегося ускорения, а по ним – и информацию о координатах объекта, его скорости, курсе и ориентации. При этом исходной информацией об абсолютной угловой скорости является разность сумм показаний противолежащих пар акселерометров, а кажущегося ускорения – разность показаний каждой пары противолежащих акселерометров.

На рисунке блоки III и IV – частотно-фазовые фильтры. Блок V – блок выработки навигационной информации и данных об ориентации объекта.

На рассматриваемую ИНС нами получено авторское свидетельство на изобретение [4].

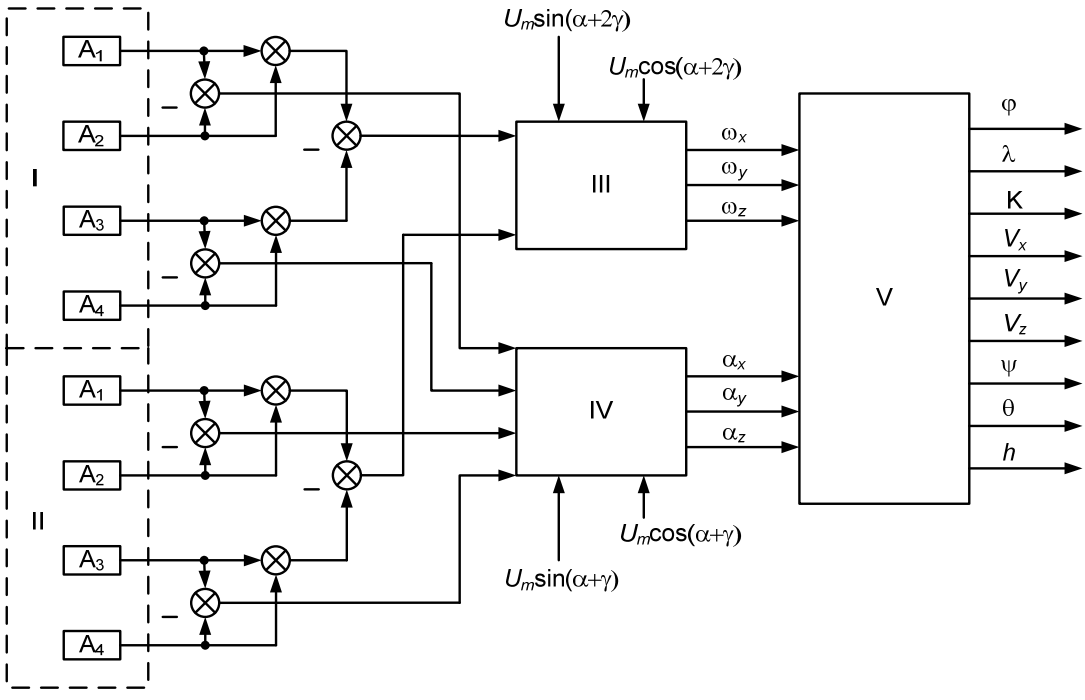


Схема ИНС на линейных акселерометрах (объяснения в тексте)

Для нахождения искомой информации об угловой скорости и кажущегося ускорения свяжем с объектом координатную систему X_0, Y_0, Z_0, а с площадкой акселерометров – трехгранник X, Y, Z таким образом, чтобы ось $0Z$ была перпендикулярна плоскости расположения акселерометров. Тогда, как было показано ранее [3], из выходного сигнала, представляющего собой разность суммы сигналов первой и второй пары акселерометров, можно выделить информацию о составляющих абсолютной угловой скорости. Аналогично можно показать, что разность показаний каждой пары противолежащих акселерометров несет информацию о составляющих кажущегося ускорения.

Существенно отметить, что в выходных сигналах как угловой скорости, так и кажущегося ускорения отсутствуют явно выраженные синхронные помехи, связанные с воздействием гравитационных полей, переносных ускорений и принудительного вращения. Более того, использование в ИНС двух акселерометрических датчиков по некоторым составляющим угловой скорости и ускорения приводит к избыточной информации, что может быть использовано для повышения точности ИНС.

Как следует из рисунка, разность сумм сигналов двух пар антипараллельных акселерометров каждого из датчиков поступает на вход фазового детектора (III) с опорным напряжением $U_m\sin(\alpha+2\gamma)$ и $U_m\cos(\alpha+2\gamma)$, на выходе которого получаются сигналы, пропорциональные двум составляющим угловой скорости.

Для определения составляющих кажущегося ускорения исходной информацией является разность сигналов противоположных акселерометров, поступающая на вход фазового детектора (IV) с опорным напряжением $U_m\sin(\alpha+\gamma)$ и $U_m\cos(\alpha+\gamma)$.

С фазовых детекторов информация о составляющих абсолютной угловой скорости и кажущегося ускорения поступает в блок V – блок выработки навигационной информации, в котором по известным алгоритмам вырабатываются данные о координатах (φ, λ), курсе (К), составляющих скорости (V_x, V_y, V_z), качке объекта (ϕ, θ) и глубине его нахождения (h).

В заключение следует еще раз отметить, что рассмотренная схема использования линейных акселерометров в ИНС в совокупности с фазовыми детекторами позволяет значительно снизить влияние целого ряда помех, связанных с нестабильностью скорости принудительного вращения датчиков, воздействием гравитационного поля, переносных ускорений, а также смещения нуля акселерометров, их дрейфа и неравенства масштабных коэффициентов.

При обеспечении приемлемой точности такой ИНС это позволяет в значительной степени ослабить требования к точностным характеристикам акселерометров; вместо акселерометров с чувствительностью $(10^{-9} – 10^{-11})$ g использовать в такой ИНС акселерометры с уже достигнутой чувствительностью, порядка $(10^{-6} – 10^{-5})$ g.

Положительной особенностью рассматриваемой ИНС является также высокая степень унификации ее основных чувствительных элементов, их меньшие по сравнению с гироскопами массогабаритные характеристики и стоимость, а также более простая технология изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Ч. 1. Автономные системы. – М.: Наука, 1966. – 256 с.
2. Захарьин М. И., Захарьин Ф. М. Кинетика инерциальных систем навигации. М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.
3. Малеев П.И. Способ измерения абсолютной угловой скорости линейными акселерометрами // Навигация и гидрография. – 2020. – № 59. – С. 24–31.
4. Авторское свидетельство № 103011 (СССР). Безгироскопная инерциальная навигационная система / Малеев П. И., Голован А. А. и др. Приоритет от 26.04.1976 г.

INERTIAL NAVIGATION SYSTEM BASED ON ACCELEROMETERS ALONE

P. I. Maleev («GNINGI» JSC)

Schemes of inertial navigation systems (INS) based only on accelerometers (without gyroscopes) have been known for a long time. However, it is not possible to implement them due to the extremely high requirements for accelerometers. The proposed sensor of absolute angular velocity on accelerometers allows us to solve this problem. The scheme of such an INS considered below uses accelerometers with an already achieved sensitivity threshold, which provides a high degree of unification of its main elements, their lower mass-dimensional characteristics and cost compared to gyroscopes, as well as greater ease of manufacture.

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

УДК 528.92

МЕТОД ПОСТРОЕНИЕ КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАВИГАЦИИ ПО ПОЛЮ РЕЛЬЕФА ДНА

В. Ю. БАХМУТОВ (АО «ГНИНГИ»),
Ю. Н. ЖУКОВ (ФГБУ «ГОИН им. Н. Н. ЗУБОВА»)

В статье рассмотрен метод навигации по рельефу дна, отличный от известных. Метод состоит в построении координатной системы по рельефу дна в районе плавания аппарата с использованием интегрального преобразования Радона. Дополнительным преимуществом метода является возможность определения пространственной ориентации подводного аппарата относительно сторон света на основе обработки информации по рельефу.

В настоящее время использование систем навигации стало важнейшим составным элементом транспортной и военной инфраструктур. Для построения навигационных комплексов автономных аппаратов применяются инерциальные навигационные системы (ИНС). Однако ИНС имеют один существенный недостаток – при автономном функционировании с течением времени происходит накопление ошибок в определении координат и вектора скорости, в связи с чем возникает задача коррекции. Для оценивания ошибок в определении координат ИНС могут быть использованы методы навигации по измерениям поля высот рельефа дна.

Высокие требования к надежности и точности средств позиционирования автономных аппаратов привели в 1960-х гг. к созданию методов навигация по геофизическим полям. Системы подобного типа получили название корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС). Они применяются для высокоточного определения местоположения автономных аппаратов как воздушного, так и подводного базирования [1].

Системы КЭНС автономных подводных аппаратов (АПА) требуют предварительного картографирования подводного рельефа того района, где предполагается их применение. Предварительно полученная информация о глубинах дна хранится в памяти ЭВМ. При движении АПА производится идентификация вертикального профиля рельефа вдоль истинной траектории пути с помощью измерителя поля высот рельефа дна, а затем организуется поиск в памяти ЭВМ наиболее похожего, заранее загруженного профиля с известными координатами [1]. Технически метод КЭНС реализуется следующим способом. Каждой паре упорядоченных числовых значений (φ,λ) (φ – широта, λ – долгота) ставится в соответствие пара числовых значений (σ,ρ) (σ – дисперсия, ρ – радиус

корреляции), вычисленных для некоторого линейного участка рельефа с центром в точке (φ,λ). Процедура сопоставления представляет собой минимизацию абсолютной разности значений $(\sigma,\rho)_\Omega$, измеренных во время плавания, и значений $(\sigma,\rho)_\Sigma$, хранящихся в памяти ЭВМ. Точка (φ,λ), дающая наибольшую близость этих значений, определяет истинное местоположение автономного подводного аппарата.

Однако метод КЭНС для навигации по рельефу дна недостаточно эффективен по причине малой изрезанности рельефа дна. Дело в том, что, по определению, всякая координатная система основывается *на принципе однозначности кодирования местоположения точки*. Применение КЭНС в Мировом океане требует, чтобы каждая точка рельефа дна в районе плавания имела свои уникальную пару значений (σ,ρ). В противном случае дублирование значений (σ,ρ) для различных точек приведет к неоднозначным результатам в навигации по рельефу. Очевидно, что это требование однозначности очень жесткое. Принцип единственности для КЭНС если и реализуется, то только в достаточно малой локальной области.

Таким образом, проблема применения метода КЭНС состоит в следующем. С одной стороны, каждой точке Земли соответствует одна и только одна уникальная пара значений географических координат (φ,λ), а с другой – для многих точек Земли имеются одни и те же значения пар (σ,ρ). Поэтому, зная пару (σ,ρ), нельзя однозначно указать, какой точке (φ,λ) Земли она соответствует, таких точек может оказаться, в принципе, бесконечное число. В этом отношении метод КЭНС не эффективен для решения задач подводной навигации по рельефу дна при большой протяженности автономного плавания. Только двух упорядоченных чисел (σ,ρ), рассчитанных по рельефу дна, очевидно мало.

Для нахождения пути решения этой проблемы следует рассмотреть понятие «координатная система». В общем смысле понятие «координатной системы» представляет собой некоторую совокупность (множество) чисел, однозначно определяющих положение некоторой точки среди других точек. Количество этих точек не ограниченно, и может быть бесконечным, но для практики естественно рассматривать конечное их число. Например, географические координаты (φ,λ) – это множество из двух действительных чисел, однозначно представляющих точку на поверхности Земного шара (эллипсоида). Для ее построения используется следующий механизм. Система широт и долгот на произвольной сфере, «оцифрованная» соответствующими значениями (φ,λ), плотно заполняет поверхность сферы. Однако для однозначности географической системы координат необходимо еще зафиксировать положение «экватора» и «нулевого меридиана», пересечение которых вводит «нулевую» точку (0,0). Очевидно, что географическую систему координат всегда можно построить для двумерной замкнутой поверхности топологически эквивалентной сфере, например, для эллипсоида. На незамкнутых поверхностях, локально эквивалентных евклидовой плоскости, однозначными координатами будет множество из двух чисел (x,y) – эвклидовы координаты. Такие координаты используются в картографических проекциях, например, проекции Меркатора.

Географическая система координат – не единственная для сферы. Например, в астрономии используют небесные координаты – упорядоченную пару угловых величин – прямое восхождение и склонение.

Для сферы можно построить и координатную систему из трех координат. Для этого нужно считать, что сфера вложена в трехмерное евклидово пространство. Тогда координатной системой сферы могут служить три числовые компоненты – (ρ, φ, θ), где ρ – расстояние от центра евклидовой системы координат, помещенной в центр сферы, до поверхности сферы, φ – азимут, θ – полярный угол.

Координаты на плоскости и в пространстве можно вводить бесконечным числом разных способов. Решая ту или иную математическую или физическую задачу методом координат, можно использовать различные координатные системы, выбирая ту из них, в которой задача решается проще или удобнее в данном конкретном случае.

Таким образом, координатные системы являются упорядоченным числовым множеством, обеспечивающим решение прикладных задач. Количество компонент в координатной системе определяется содержанием прикладной задачи и удобством ее решения. С этой точки зрения, координатная система для навигации по рельефу также должна строиться, исходя из практических требований к ней.

Сформулируем задачу построения координатной системы для навигации по рельефу дна. Задана система географических координат на Земном шаре (φ, λ). По данным известных глубин $h(\varphi, \lambda)$ рельефа дна океана необходимо построить другую координатную систему $\{I_i\}$ ($i = 1,..., n$) – такую, в которой для каждой точки (φ, λ) существует единственное уникальное значение вектора $\{I_i\}$. Причем очевидно, что каждая компонента I_i этой системы координат должна являться некоторой функцией f_i от поля рельефа дна:

$$I_i(\varphi, \lambda) = f_i(h(\varphi, \lambda)). \quad (1)$$

Таким образом, каждая компонента I_i образует векторное поле числовых значений над значениями географических широт и долгот. Местоположение некоторой точки определяется всей совокупностью компонент $\{I_i\}$. Число n координат в системе $\{I_i\}$ должно быть минимальным, то есть таким, которое обеспечивает однозначность выражения (1) во всем районе плавания.

Сформулированная задача сводится к нахождению системы функций $\{f_i\}$ от поля рельефа дна $h(\varphi, \lambda)$. Определим основные требования к системе функций $\{f_i\}$, вытекающие из практики подводного плавания автономных аппаратов. Эти требования связаны с ошибками измерения рельефа дна при измерении глубин двух видов: за счет погрешности в определении глубины погружения аппарата и возмущении в движении самого аппарата.

В первом случае большой вклад в погрешности измерения рельефа дна оказывает сложность определения «глубины» плавания подводного аппарата.

Действительно, определение глубины погружения возможно только по отношению к поверхности моря по гидростатическому давлению. Гидростатическое давление – это сложная термодинамическая зависимость давления от интеграла вертикального распределения плотности морской воды от АПА до морской поверхности. Проблема оценки «глубины» погружения связана с неизвестным фактическим распределением плотности воды и неизвестным уровнем морской поверхности. Свободная поверхность моря изменяется за счет волнения и приливов, а плотность – за счет турбулентных движений морских водных масс. Погрешности оценки глубины приводят к погрешностям в оценке поля рельефа $h(\varphi,\lambda)$. Чтобы эти погрешности не возрастали после применения к полю глубин функций $\{f_i\}$, данные функции должны обладать свойством нивелирования этих погрешностей. Такими свойствами обладают функции, имеющие интегральный вид, так как сумма ошибок со случайными знаками стремиться к нулю.

Другим источником искажений при измерении рельефа дна на борту аппарата будут являться возмущения при его движении. Искажения в измерениях нелинейно зависят от величин углов дифферента, крена и рысканья аппарата. В простейшем случае искажения в измерениях рельефа можно представить проективными искажениями: сдвига (аддитивные), масштабирования, поворота, ракурсов (рис. 1).

Рис. 1. Основные виды проективных искажений при измерении рельефа с движущегося АПА

Причиной таких искажений являются разнообразные турбулентные движения водных масс морской среды. Наиболее значимые явления – приливные колебания и приливные течения, внутренние волны, различные вихревые структуры, фронты водных масс и т. д. Следовательно, система функций $\{f_i\}$ должна обладать свойством инвариантности к таким возмущениям.

Приведем описание общего принципа построения координатной системы $\{I_i\}$ с учетом указанных требований к функциям $\{f_i\}$. В этом случае систему функций $\{f_i\}$ можно определить, если измерения глубин рельефа дна на борту движущегося АПА проводить с помощью многолучевого эхолота. При этом измеряются глубины рельефа дна в некоторой полосе относительно траектории движения аппарата, т. е. существует возможность использовать не измерения вдоль траектории движения аппарата, а измерения глубин на некоторой области вокруг траектории движения. Тогда для построения системы функций $\{f_i\}$ естественно использовать интегральное преобразование Радона [2, 3].

Пусть дан прямоугольный участок поверхности рельефа дна (рис. 2). Введем в этой области декартовы координаты x и y. Рассмотрим множество пересекающих

его прямых $l(r,\theta,t)$, которые определяются параметрами r – длина нормали от начала координат до прямой $r = x\cos\theta + y\sin\theta$ (θ – угол между нормалью и положительной осью x, t – параметр вдоль прямой l). Тогда преобразование Радона R участка поверхности рельефа дна $h(x,y)$, заданного в эквидистантных точках этой прямоугольной области, является функцией $p(r,\theta)$, которая определяется путем вычисления интеграла от $h(x,y)$ по всем линиям $L(r,\theta)$:

$$R = p(r,\theta) = \iint_D h(x,y)\delta(r - x\cos\theta - y\sin\theta)dxdy \qquad (2)$$

где D – область определения $h(x,y)$ и δ – функция Дирака.

Затем преобразование Радона $p(r,\theta)$ представим бесконечной системой степенных моментов относительно r [4]:

$$M_k(\theta) = \int p(r,\theta)r^k dr, \qquad k = 0,1,\ldots . \qquad (3)$$

Моменты $\{M_k\}$ функции $p(r,\theta)$ являются одномерными функциями от угла θ и в совокупности однозначно представляют $p(r,\theta)$. Заметим, что моменты $\{M_k\}$ не имеют никакого отношения к теории вероятностей. Теория моментов – это раздел математики, который имеет собственное значение и существовал задолго до возникновения теории вероятностей, которая использует результаты этой теории [5].

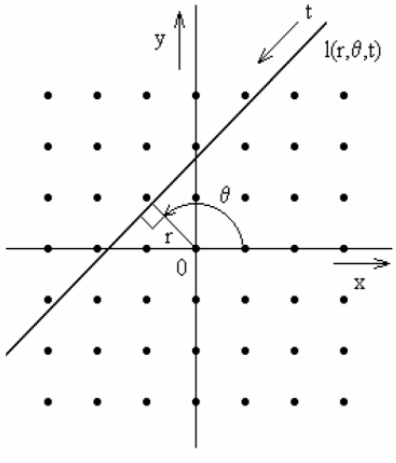


Рис. 2. Иллюстрация к определению параметров преобразования Радона

Таким образом, мы построили бесконечную систему одномерных функций $\{M_k\}$, однозначно соответствующую полю рельефа $h(x,y)$ в квадратной области акватории D. Причем использовали только интегральные преобразования, которые не увеличивают погрешностей измерения $h(x,y)$.

Теперь, если сведем каждую функцию M_k к одному числу I_k, т. е. возьмем функционал от M_k, получим бесконечную упорядоченную числовую систему $\{I_k\}$, однозначно представляющую $h(x, y)$. В качестве возможных функционалов можно использовать функционалы, применяемые в так называемом преобразовании Trace [6], которое является обобщением преобразования Радона. В работах [6, 7] изложен метод построения функционалов Φ_k со свойствами инвариантности к повороту, смещению, афинному преобразованию, масштабированию. Как указывалось выше, необходимость таких свойств инвариантности диктуется наличием возмущений в движении подводного автономного аппарата.

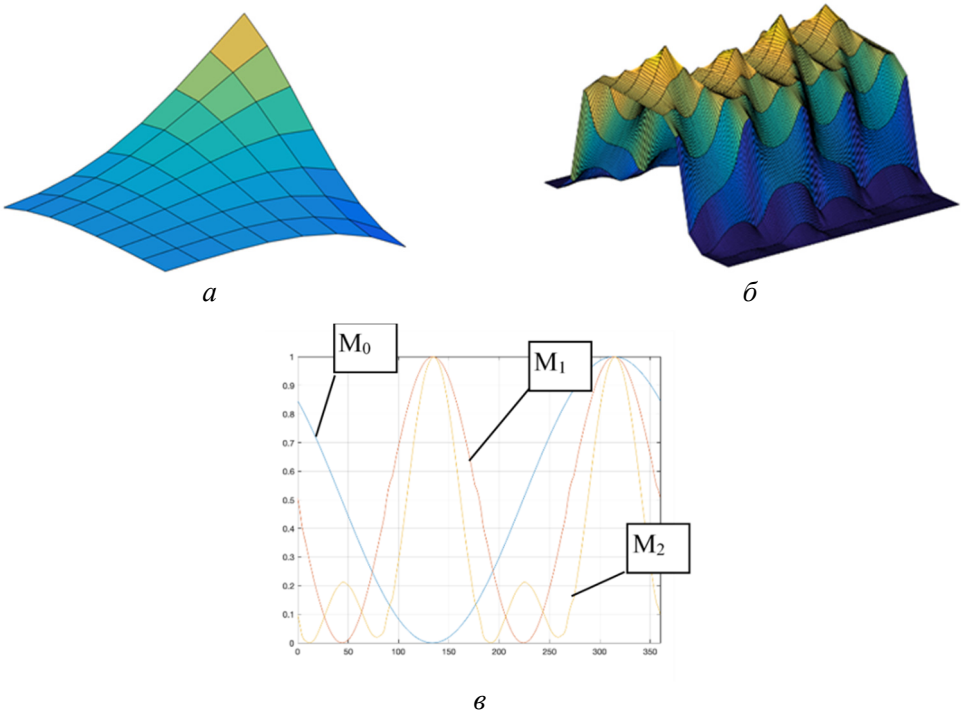
В качестве примера приведем три функционала Φ_k:

$$\Phi_0 = \int I'^2(\theta) d\theta, \tag{4}$$

$$\Phi_1 = \max(I(\theta)), \tag{5}$$

$$\Phi_2 = \int I(\theta) d\theta. \tag{6}$$

На рис. 3 представлен пример последовательности расчета преобразования Радона и вычисления первых трех степенных моментов этого преобразования.



а *б* *в*

Рис. 3. Иллюстрация результатов вычислений преобразования Радона (3*б*), трех первых степенных моментов (3*в*) для поверхности, представленной слева (3*а*). Степенные моменты представлены в нормированном виде

Окончательно, общий вид необходимых преобразований участка рельефа дна $h(x,y)$ для построения координатной системы $\{I_k\}$ можно записать в следующем виде:

$$I_k = \Phi_k\left(M_k\left(R\left(h(x,y)\right)\right)\right), \tag{7}$$

где R – преобразования Радона, M_k – преобразования получения степенных моментов от преобразования Радона, Ω_k – функциональное преобразование.

Изложенный принцип построения координатной системы для навигации по рельефу дна позволяет построить соответствующий метод.

Предварительный этап – расчет координатной системы $\{I_k\}$ по массиву глубин рельефа дна $h(\varphi,\lambda)$ в районе плавания подводного аппарата. Рельеф дна представляется в стереографической проекции с евклидовыми координатами $h(x,y)$.

Исходными параметрами метода являются: база данных глубин рельефа дна в эквидистантных точках на акватории плавания $h(x,y)$, размер квадратной области скользящего окна для вычислений значений координат для центральной точки квадрата $h_0(x,y)$, размер шага скольжения квадратного окна Δx ($\Delta x = \Delta y$), число координат n. Число n выбирают порядка десяти, чтобы обеспечить однозначность системы координат $\{I_k\}$.

Для каждого положения скользящего окна $h_0(x,y)$ вычисляют

– преобразование Радона $R\left(h_0(x,y)\right) = p(r,\theta)$;
– n степенных моментов $M_k\left(p(r,\theta)\right)$, $k = 0,1,...,n$;
– n функционалов $\Phi_k\left(M_k\right) = I_k$, $k = 0,1,...,n$.

Полученные значения $\{I_k\}$ записывают в массив данных ЭМВ, приписывая значения широты и долготы центра квадрата $h_0(x,y)$. Получают массив данных $\{I_k\}(\varphi,\lambda)$.

Оперативный этап – навигация по рельефу во время плавания подводного аппарата.

Исходные данные – измеренные многолучевым эхолотом глубины в некотором квадрате $h_s(x,y)$, размера, соответствующего размеру $h_0(x,y)$. Координатная система $h_s(x,y)$ является локальной системой относительно центра подводного аппарата.

Для каждого квадрата измеренных глубин вычисляют:

– преобразование Радона $R\left(h_s(x,y)\right) = p(r,\theta)$;
– n степенных моментов $M_k\left(p(r,\theta)\right)$, $k = 0,1,...,n$;
– n функционалов $\Phi_k\left(M_k\right) = {}^{s}I_k$, $k = 0,1,...,n$.

В массиве данных ЭВМ среди всех значений $\{I_k\}(\varphi,\lambda)$ находят те значения координат, которые наиболее близки к вычисленным $\{{}^{s}I_k\}$. Соответствующие географические координаты $\{I_k\}(\varphi,\lambda)$ и будут географическими координатами местоположения аппарата.

Пример применения рассмотренного метода представлен на рис. 4. Для расчета использовались следующие параметры: $n=3$, $\Delta=1$, размер общего квадрата – 50×50 точек, размер скользящего окна – 5×5 точек.

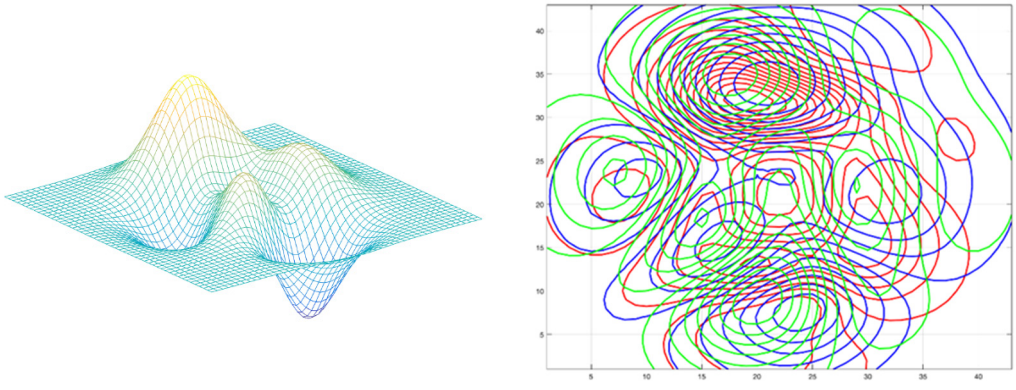


Рис. 4. Иллюстрация применения метода построения координатной системы для формы рельефа, представленной слева. Справа – изолинии первых трех функционалов: синие, зеленые и красные линии

Преимущество предложенного метода, кроме построения однозначной координатной системы, состоит в том, что он не зависит от точности определения пространственной ориентации подводного аппарата относительно сторон света. Более того, метод позволяет определить неизвестную ориентацию после вычисления местоположения по рельефу. Это возможно осуществить, так как степенные моменты M_k от преобразования Радона являются однородными многочленами степени k от $\cos\theta$ и $\sin\theta$ [4] . Это визуально заметно на рисунке 3*в*. Для этого следует вычислить угол ${}^{s}\theta m$, при котором значение ${}^{s}M_0(\theta)$ максимально, и сравнить его с таким же углом θm, вычисленным на этапе предварительной обработки. Разность этих углов соответствует ошибке в оценке пространственной ориентации на борту подводного аппарата.

Таким образом, рассмотрен метод навигации подводного автономного аппарата по рельефу дна, отличный от метода КЭНС и имеющий по сравнению с ним существенное преимущество. Последнее состоит в том, что предложенный метод позволяет вычислить однозначные координатные системы для района плавания подводного аппарата. Кроме того, данный метод дает возможность определить пространственную ориентацию подводного аппарата относительно сторон света. Заметим, что существует множество интегральных преобразований типа преобразования Радона [6, 7], которые могут быть использованы для построения координатной системы для навигации по полю рельефа дна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовский А. А. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем / А. А. Красовский, И. Н. Белоглазов, Г. П. Чигин. − М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 448 с.
2. Хелгасон С. Преобразование Радона. – М.: Мир, 1983. – 150 с.
3. Бахмутов В. Ю., Жуков Ю. Н. Автоматизированный метод обнаружения объектов на морском дне по данным многолучевых гидролокаторов // Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 58–66.
4. Гельфанд И. М., Гиндикин С. Г., Граев М. И. Избранные задачи интегральной геометрии. – М.: Добросвет, 2000. – 208 с.
5. Ахиезер Н., Крейн М. О некоторых вопросах теории моментов. – Харьков: ОНТИ Украины, 1938. – 256 с.
6. Kadyrov A., Petrou M. The Trace transform and its applications // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI. – 2001. – Vol. 23. – Pp. 811– 828.
7. Kadyrov A., Petrou M. Object descriptors invariant to affine distortions // British Machine Vision Conference, BMVC2001. – Sept. 10–13, Manchester, UK. – T. Cootes and C. Taylor (eds.). – Vol. 2. – Pp. 391–400.

METHOD FOR CONSTRUCTING A COORDINATE SYSTEM FOR NAVIGATING THE FIELD THE SEABED TOPOGRAPHY

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

The article considered a method of navigation on the seabed topography which is different from the known ones. The method consists of constructing a coordinate system on the seabed topography in the navigation area of the underwater vehicle using the integral Radon transformation. An additional advantage of the method is the ability to determine the spatial orientation of the underwater vehicle relative to the cardinal directions based on the processing of information on the seabed topography.

УДК 551.462

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ В 2019 ГОДУ[1]

В. Ю. БАХМУТОВ, Е. В. КОЛОБОВ,
А. В. КОСТЕНИЧ, Н. В. ЧЕРВЯКОВА (АО «ГНИНГИ»)
Д. М. ЖИЛИН (ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова)

Рассмотрены основные задачи и результаты комплексных исследований, выполненных под руководством и при участии специалистов Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института, в интересах обоснования Внешней границы континентального шельфа России в Арктике. Впервые в мировой практике в тяжелых ледовых условиях применен специфический комплекс исследований, включающий, кроме съёмки рельефа дна и гравиметрии, сейсмоакустический глубинный метод изучения подстилающих приповерхностных осадков.

Во исполнение Рекомендаций 2002 г. Комиссии по границам континентального шельфа (КГКШ) в августе 2015 г. Генеральному секретарю ООН было передано пересмотренное частичное Представление Российской Федерации в отношении континентального шельфа в Северном Ледовитом океане (далее – Заявка). Внешняя граница континентального шельфа России, обозначенная в Заявке, показана на рис. 1.

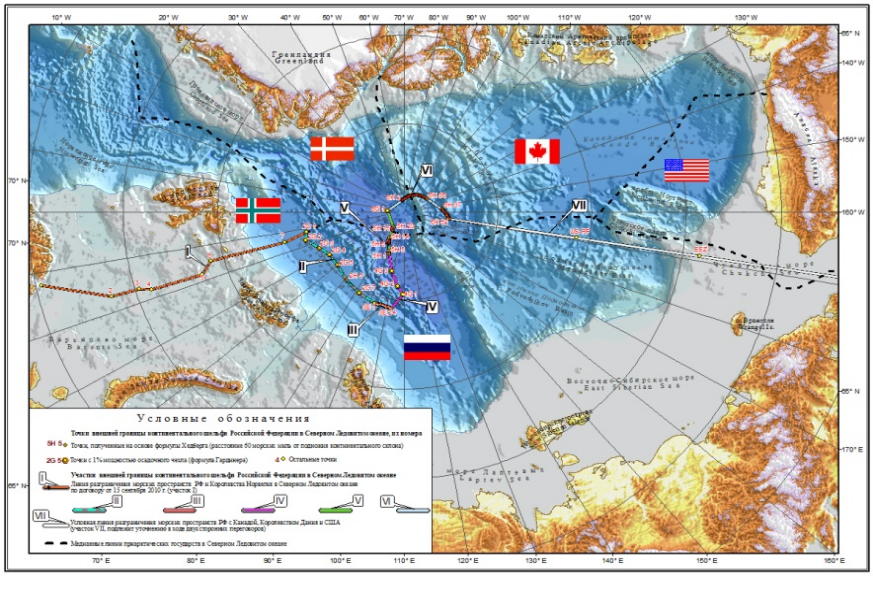


Рис. 1. Внешняя граница континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане

[1] В статье использованы отчетные документы на основе данных, представленных, в том числе, и соисполнителями работ: ФГБУ «ВНИИОкеангеология», ООО «Моргеонац».

Заявка каждого государства после её представления на пленарном заседании КГКШ предварительно детально рассматривается на Подкомиссии, которая в тесном взаимодействии с представившей документ Делегацией осуществляет экспертизу заявки. В ходе работы Делегации Российской Федерации и Подкомиссии на 41–48 сессиях КГКШ было сформулировано 17 вопросов, касающихся преимущественно разъяснений по геологической модели строения Северного Ледовитого океана.

Очередная 49-я сессия КГКШ состоялась в феврале 2019 г. Подкомиссия, проведя анализ переданных делегацией Российской Федерации материалов, посчитала необходимым предоставить информацию относительно внешней границы континентальной шельфа (ВГКШ) в южной части Евразийского бассейна с тем, чтобы продемонстрировать, что расстояние между формульной линией Гардинера [1–3] в котловине Амундсена и 200-мильной исключительной экономической зоне в котловине Нансена в южной части бассейна не превышает 60 морских миль (табл. 1). Участок расширенного континентального шельфа в пределах южной части хребта Гаккеля, требующий дополнительного обоснования, представлен на рис. 2. Как видно из табл. 1, расстояние между точками Гардинера, построенными по результатам работ 2010–2014 гг., с 28 по 32 профиль превышают критическое расстояние.

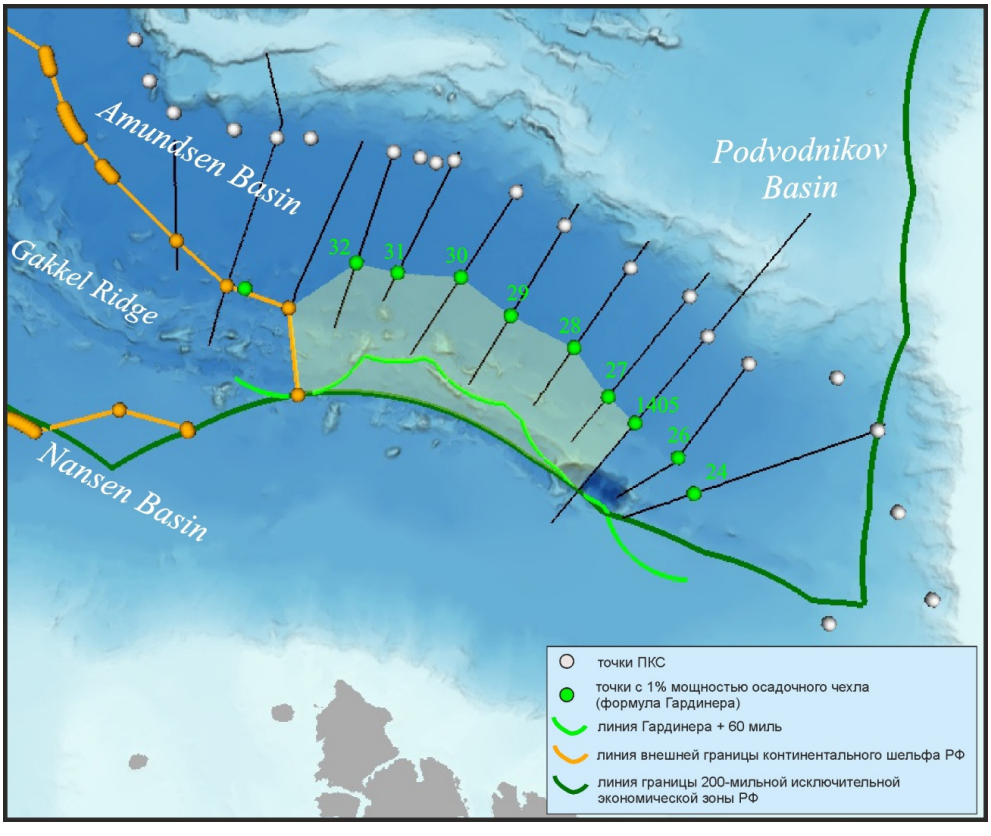


Рис. 2. Участок расширенного континентального шельфа в пределах южной части хребта Гаккеля, требующий дополнительного обоснования

Таблица 1

Таблица расстояний между формульной линией Гардинера в котловине Амундсена, до 200-мильной исключительной экономической зоной в котловине Нансена

Профиль	Расстояние, км	Расстояние, морские мили
24	62	33
26	96	52
1405	110	59
27	117	63
28	144	78
29	141	76
30	165	89
31	154	83
32	162	87
34 (4G1)	110	59

Обоснование включения южной части хребта Гаккеля в состав расширенного континентального шельфа и являлось основной задачей исследований 2019 г.

Решение поставленной Подкомиссией задачи может быть реализовано с определенной степенью вероятности хотя бы одним из трех сценариев:

1. Определение формульной линии Хёдберга (60 морских миль от подножия континентального склона) в котловине Нансена так, чтобы она располагалась дальше 200-мильного лимита от Баренцево-Карской континентальной окраины и не ближе границы, обозначенной светло-зеленой линией на рис. 2.

2. Создание такой непротиворечивой геолого-геофизической модели донных осадков, которая позволит обоснованно отнести точки Гардинера, построенные по данным сейсмобатиметрических профилей 2011–2014 гг. (рис. 2) ближе к хребту Гаккеля.

3. Определение координат точек подножия континентального склона (ПКС) и формульных линий с северо-восточного и юго-западного склонов хребта Гаккеля для его включения в зону континентального шельфа России, по крайней мере, до секторальной линии. Но это возможно только в случае обоснования морфологической непрерывности континентальной окраины с хребтом Гаккеля, то есть признанием хр. Гаккеля не океаническим, а подводным хребтом [1–3].

Остановимся более подробно на каждом из этих сценариев, что целесообразно как для более глубокого теоретического ознакомления с возникшей проблемой, так и для практического выбора комплекса методов исследований 2019 г.

1. *Определение формульной линии Хёдберга в котловине Нансена*

Анализ показывает, что котловина Нансена в этом районе очень мало изучена. Здесь почти не проводились современные высокоточные батиметрические и геофизические исследования.

Линия Хёдберга, построенная в Заявке на расширенный континентальный шельф 2001 г. по батиметрической модели на основе базы батиметрических данных Гидрографической службы ВМФ России, не выходила за пределы 200-мильной (исключительной экономической) зоны. Перед проведением дополнительных гидрографических исследований 2010 г. этот факт подтвердился уже на основе

цифровой модели International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO, v. 2) [4]. Поэтому проведение батиметрических исследований для обоснования границы континентального шельфа в южной части котловины Нансена в то время не считалось необходимым.

Определения основания континентального склона (ОКС), ПКС и линии Хёдберга при этом базировалось только на батиметрических измерениях (основной метод определения ПКС [1]).

В Заявке, поданной Норвегией [5] и принятой Комиссией по границам континентального шельфа в 2009 г., положение зоны ОКС было определено сейсмоакустическим методом на основе показаний профилографа TOPAS PS 18 в зоне основания ледниково-морских конусов выноса, что позволило сместить точки ПКС дальше вниз по континентальному склону, ближе к хребту Гаккеля, относительно точек ПКС, определенных только на основе батиметрических работ.

Для обоснования положения точек ПКС в котловине Нансена необходимо использовать подход, аналогичный норвежскому. При этом основной задачей является построение формульной линии Хедберга в котловине Нансена, основанной на модели строения морского дна, с учетом положения точек подножия континентального склона, расположенных в зоне с регионально значимым изменением градиента, которая соответствует внешней (мористой) границе многочисленных элементов придонных осадков, формирующих склон ледниково-морскими конусами выноса и гравитационными оползнями из прогибов Баренцево-Карской континентальной окраины.

В случае получения ожидаемого положения точек ПКС будет получен ответ на запрос Подкомиссии.

Вопрос наличия и распространения элементов континентального склона, сформированных современными геологическими процессами (в том числе ледниково-морскими конусами выноса, гравитационными оползнями и др.), в приповерхностной части геологического разреза континентальной окраины котловины Нансена совершенно не изучен даже в районе мощного конуса выноса осадков напротив устья трога Святой Анны. Поступление осадков с шельфа на континентальный склон и подъем в намеченном районе, несомненно, имеет место, однако о его характере, объеме и дальности распространения в пределы ложа котловины можно будет судить только при получении конкретных данных.

Такие данные можно получить с применением методов непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП):

– с помощью параметрического профилографа;

– с помощью буксируемого устройства, с короткой (до 30 м) сейсмокосой и электроискровым источником возбуждения упругих волн.

2. *Создание новой геолого-геофизической модели донных осадков*

Для смещения точек Гардинера, определенных по результатам сейсмобатиметрических работ 2011–2014 гг., ближе к хребту Гаккеля можно попытаться создать уточненную сейсмоплотностную модель, на которой определить «смещенное положение точек Гардинера».

Смысл такого моделирования заключается в том, чтобы подобрать модель структурно-вещественных подразделений земной коры, определив их геометрическую конфигурацию и значения плотностей. При этом гравитационное

поле, рассчитанное по такой модели путём решения прямой задачи гравиметрии, должно соответствовать наблюдённому полю силы тяжести с определённой погрешностью, которая выбирается исходя из геологической задачи, качества данных съёмки, а также наличия априорной информации. Таким образом, в конечном итоге, решается обратная задача геофизики – по наблюдённым значениям поля определяется геологическое строение. Сейсмические данные используются для введения граничных условий в плотностную модель с целью повышения достоверности результатов моделирования.

В качестве априорных данных при моделировании могут быть использованы сейсмические материалы МОВ, полученные с налётных станций воздушной высокоширотной экспедиции (ВВЭ) «Север» [6], материалы МОВ-ОГТ экспедиции «Шельф-2011», а также материалы зондирований МОВ-МПВ для оценки скоростей прохождения сейсмических волн.

Таким образом, в комплекс работ целесообразно включить гравиметрические исследования.

3. Батиметрические исследования хребта Гаккеля

Проведение батиметрических исследований по галсам, ортогонально пересекающим хребет Гаккеля, полезно для детального изучения морфологии хребта и получения данных с целью возможности отнесения его к категории подводных хребтов и включения в российский континентальный шельф по аналогии с заявками Исландии и Дании [7, 8]. Это позволит провести границу нашего континентального шельфа по секторальной линии и, соответственно, решит проблему принадлежности южной части хребта Гаккеля к континентальному шельфу России.

Очевидно, это задача более широкая, чем та, которую поставила Подкомиссия.

Исходя из реальной обстановки (очень ограниченного по времени подготовительного и, как следствие, экспедиционного периода) наиболее реальными для решения поставленной задачи представлялись первый и второй сценарии в комплексе. При этом расположение галсов исследований могли положить начало исследованиям и по третьему сценарию.

Состав комплексных исследований в Северном Ледовитом океане 2019 г. представлен в табл. 2.

Таблица 2

Комплекс исследований 2019 года

№ п/п	Виды исследований	Определяемые параметры
1	Съёмка рельефа морского дна многолучевым и однолучевым эхолотами	– Количественные характеристики рельефа дна; – положение изобаты 2500 м; – положение ПКС по данным батиметрических профилей.
2	Акустическое профилирование профилографом TOPAS PS 18 (высокой частоты)	– Количественные характеристики рельефа дна однолучевым эхолотом (опция профилографа) для дополнительных независимых батиметрических данных; – модель подстилающей поверхности донных осадков в верхней части разреза; – по возможности (в зависимости от глубины проникновения), положение зоны ОКС.

№ п/п	Виды исследований	Определяемые параметры
3	Акустическое профилирование МОВ ОГТ 2D с косой в 30 м (низкой частоты)	– Модель подстилающей поверхности донных осадков на глубину, достаточную для выявления многочисленных элементов континентального склона, сформированных современными геологическими процессами (в том числе, ледниково-морскими конусами выноса, гравитационными оползнями и др.) в окрестностях прогиба Святой Анны и других прогибов Баренцево-Карского шельфа; – положение зоны ОКС.
4	Гравиметрические исследования	– Структура земной коры (сейсмоплотностные модели земной коры) на основе плотностного моделирования с привлечением ретроспективных сейсмических данных.
5	Гидрологические исследования	– Вертикальное распределение скорости звука в воде с учетом гидрологических условий (температура, соленость и давление) на различных глубинах для введения необходимых поправок в данные съёмки рельефа морского дна.

Такая конфигурация методов впервые (по крайней мере, в России) применяется в глубоководных условиях, при наличии сложной ледовой обстановки для решения задач определения ВГКШ, что подразумевает научно-исследовательский характер проводимых исследований с непосредственной разработкой методики как отдельных видов работ, так и комплексных исследований, в процессе проведения работ. Данное обстоятельство накладывает более жесткие требования к контролю качества выполнения работ на всех этапах для получения желаемого результата.

Система галсов комплексных исследований с гидрологическими станциями представлена на рис. 3.

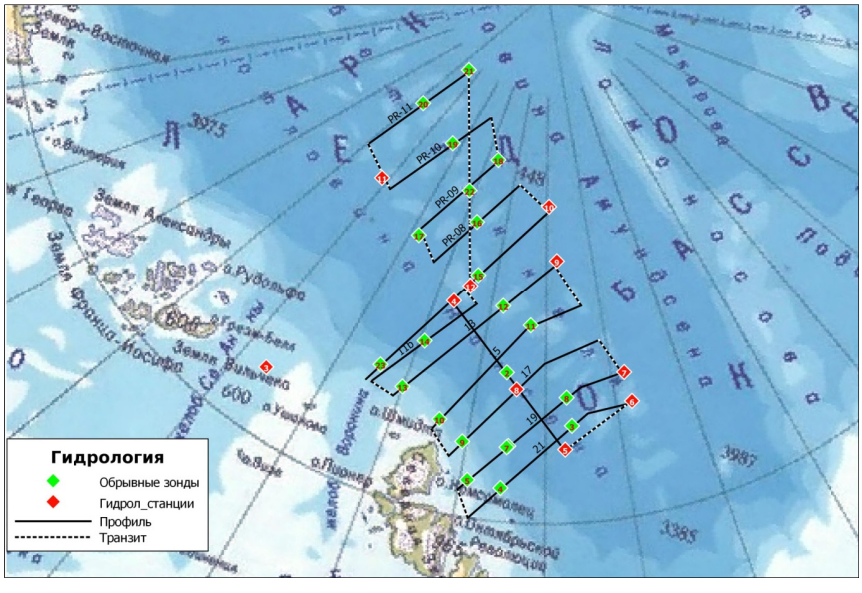


Рис. 3. Система галсов комплексных исследований

Для обеспечения судового и ледокольного сопровождения и обеспечения качественного выполнения всех поставленных задач в качестве соисполнителей были привлечены следующие организации (табл. 3).

Таблица 3

Соисполнители работ

Организация	Функции
УНиО Минобороны России	Заказчик работ, предоставление гравиметров для исследований
АО «ГНИНГИ»	Головной исполнитель работ
ФГБУ «ААНИИ»	Судовое обеспечение комплексных исследований, специализированное ГМО
ФГУП «Атомфлот»	Ледокольное обеспечение
ООО «Гидро-Си»	Технико-методическое обеспечение батиметрических работ
ООО «Моргеонац»	Научно-технический контроль выполнения комплексных исследований. Контроль качества данных
ФГБУ «ВНИОкеанологии им. И. С. Грамберга»	Обработка материалов низкочастотного акустического профилирования и подготовка дополнительных материалов для обоснования ВГКШ РФ в СЛО
ООО «Морские Инновации»	Выполнение акустического профилирования с использованием буксируемого аппаратно-программного комплекса

Комплексные исследования 2019 г. проводились с борта научно-экспедиционного судна (НЭС) «Академик Федоров» под проводкой на начальном этапе работ атомного ледокола (АЛ) «Таймыр», позднее, в более сложных ледовых условиях – АЛ «50 лет Победы».

Съёмка рельефа морского дна многолучевым и однолучевым эхолотами выполнялась навигационно-гидрографическим комплексом на основе многолучевого эхолота (МЛЭ) EM 122 фирмы Конгсберг (Норвегия) [9], установленного ГНИНГИ на НЭС «Академик Федоров» ещё в 2010 г. Съёмка и обработка результатов выполнялись по методике, отработанной в течение экспедиций 2010–2014 гг. [10–24].

Гидрологические и гравиметрические исследования также успешно проводились в экспедициях 2010–2014 гг. (гидрология) [25, 26] и 2014 г. (гравиметрия) и поэтому не сопровождались никакими принципиальными проблемами. А вот непрерывное сейсмоакустическое профилирование проводилось в таких условиях и с такими требованиями впервые.

У профилографа TOPAS PS 18 [27] ранее нами использовалась только опция однолучевого эхолота для дополнительного контроля данных МЛЭ. Задача получения качественных сейсмоакустических данных не ставилась. Кроме того, в 2019 г. появилась задача обработки полученных профилографом сейсмоакустических данных при отсутствии у организаций, занимающихся проблемами ВГКШ, опыта

подобных работ. Поэтому в экспедиции требовалась участие специалистов по сейсмоакустике для работы на профилографе и дальнейшей обработки полученных материалов с высоким качеством, что и было успешно осуществлено.

Профилограф использовался для выполнения работ по непрерывному сейсмоакустическому профилированию (НСП) для изучения верхней части разреза и оценки характеристик донных отложений, а также геологического строения на глубину до 30–70 м с разрешающей способностью до 0,5 м.

При сборе данных применялся режим «CHIRP» – импульс с линейной частотной модуляцией и перебором частот от 2 до 6 кГц. Частотный режим, как и другие параметры, были выбраны во время тестов и испытаний оборудования на переходе судна из п. Санкт-Петербург к району работ как оптимальные исходя из следующих критериев:

- наилучшее соотношение сигнал/шум;
- максимальная глубина проникновения;
- высокая разрешающая способность.

Выбор частотного диапазона и энергии излучения определялся необходимостью компромисса между глубинностью и разрешающей способностью, уточнялся в процессе проведения опытно-методических работ в районе трога Святой Анны и лимитировался энергетическими возможностями источника импульсов.

Со стороны Минприроды были озвучены требования обеспечения более высокой проникающей способности в изучении приповерхностного разреза донных отложений, хотя бы до 150–200 м. Это возможно только с применением источника упругих волн с более низкой частотой, чем у профилографа.

Метод непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП) с электроискровым источником возбуждения упругих волн и приемом отраженных сигналов буксируемой сейсмокосой (МОВ ОГТ 2D) отвечает предъявленным требованиям. В качестве соисполнителя работ была выбрана организация ООО «Морские Инновации», являющаяся резидентом «Сколково». По результатам опытно-методических работ в желобе Святой Анны была выбрана центральная частота сигнала около 250 Гц.

Для удобства метод НСАП с профилографом в ходе экспедиционных работ назвался акустическим профилированием высокой частоты (АП ВЧ), а МОВ ОГТ 2D – акустическим профилированием низкой частоты (АП НЧ).

В обычной практике работ непрерывное сейсмоакустическое профилирование в модификации АП НЧ применяется преимущественно для инженерно-геологических исследований для изучения верхней части разреза донных отложений на малых и средних глубинах от нескольких десятков до первых сотен метров, максимум до 2000 м в Черном море, и при полном отсутствии ледяного покрова.

Отличительной особенностью исследований 2019 г. от привычного применения АП НЧ являлись океанские глубины до 4500 м и тяжелые ледовые условия – сплоченность льда 9–10 баллов, толщина льда 1,5–2 м, наличие не только однолетнего, но и многолетнего льда, наличие участков повышенного сжатия ледяного покрова. Такие ледовые условия приводили к быстрому частичному или полному закрытию канала за кормой судна, что значительно увеличивает риск обрыва забортного оборудования. Малое время, отведенное на подготовку экспедиции, создавало дополнительные трудности, которые выразились, в частности, в невозможности создания защитного ледового устройства.

В результате в условиях сильного сжатия льдов на некоторых участках приходилось прекращать АП НЧ и извлекать забортное оборудование в целях предотвращения обрывов сейсмокосы и буксировочного троса. При этом съёмка рельефа дна гидрографическим комплексом продолжалась. После прохождения неблагоприятного участка АП НЧ возобновлялось. К счастью, таких пропусков в процентном отношении было немного, что позволило выполнить план по объёму исследований согласно Техническому заданию (ТЗ).

Особое внимание при проведении работ обращалось на качество получаемых материалов, что возможно только при жестком контроле технологических процедур и организации обмена информацией, обеспечивающей корректность, целостность, актуальность и непротиворечивость данных.

Одним из существенных вопросов при проведении комплексной съемки является использование всеми исполнителями работ единого типа и параметров используемой проекции. Поскольку процедуры обработки данных осуществлялись в плоских прямоугольных системах координат, то во избежание возникновения искажений, возникающих при перепроецировании, использовалась единая картографическая проекция «IBCAO Polar Stereographic» (EPSG:3996) со следующими параметрами:

– тип проекции – стереографическая;
– геодезический датум – WGS 84;
– широта начала координат – 90°N;
– главная параллель – 75°N, если используется масштабный коэффициент – 1; 90°N, если используется масштабный коэффициент – 0.982966757;
– масштабный коэффициент – 1, если используется главная параллель – 75°N; 0,982966757, если используется главная параллель – 90°N;
– центральный меридиан: – 0°E;
– единица измерения – метр.

Из-за особенностей использования обозначений параметров проекции в различных программных продуктах потребовалось провести контроль правильности ввода значений параметров проекции каждым из исполнителей.

Кроме того, с целью обеспечения корректности, целостности, актуальности и непротиворечивости данных для информации из каждой предметной области были составлены «Спецификации на передаваемые/принимаемые данные». Спецификация регламентирует состав передаваемых/принимаемых типов данных, форматов файлов, расширений наименований файлов, нотаций именований файлов.

Факт передачи-приёма пакета данных регистрировался в «Ведомости передачи-приёма данных». В них фиксировались дата передачи-приёма пакета; количество файлов; объем данных в мегабайтах; наименование файла, содержащего контрольную сумму (MD5) для каждого из файлов, входящих в состав передаваемого/принимаемого пакета данных; подписи лиц, ответственных за передачу-приём данных.

Контрольная сумма файла является числом в шестнадцатиричной системе счисления (например, ce3326d73ff2e673200bdfcc77e65f79), вычисленным по алгоритму свёртки данных MD5, и однозначно зависит от содержимого файла: изменение хотя бы одного из любого байтов файла повлечёт изменение результата вычисления контрольной суммы этого файла. Контрольные суммы файлов позволяют осуществить верификацию корректности работы технических средств копирования

данных с одного носителя информации на другой, а также обнаружить несанкционированное изменение содержимого файлов передающей или принимающей стороной.

Основной принцип контроля качества – это проверка независимым способом полученных результатов на каждом этапе выполнения работ, начиная с процесса создания Программы выполнения и заканчивая изготовлением отчетных материалов. Для этого в состав экспедиции был введен отряд контроля качества, в обязанности которого входила первичная обработка «во вторую руку», параллельно с группами обработки, результатов съемки рельефа дна, АП ВЧ и АП НЧ, а также проведение сравнительного анализа результатов обработки материалов различными исследователями.

Для примера приведем процедуры контроля качества данных съёмки рельефа дна, выполняемые гидрографической партией и отрядом контроля качества.

Контроль качества данных съёмки рельефа дна гидрографической партией после первичной обработки осуществлялся на основе следующих процедур:

– анализ расхождений глубин в области контрольных пересечений полос покрытия многолучевого эхолота;

– анализ расхождений глубин однолучевого и многолучевого эхолотов на контрольных пересечениях;

– анализ расхождений глубин параметрического профилографа и многолучевого эхолотов на контрольных пересечениях;

– контроль качества результатов съемки рельефа дна с использованием технологии CUBE;

– анализ расхождений глубин в зонах наложений на батиметрических профилях 2011 и 2019 гг., на основе данных, полученных с использованием многолучевого эхолота.

Контроль качества данных съёмки рельефа дна специальным отрядом контроля качества проводился на основе следующих процедур:

– независимая обработка данных съёмки рельефа морского дна, полученных с использованием МЛЭ Kongsberg EM122;

– контроль и оценка качества результатов с использованием контрольных секущих линий;

– оценка качества путем сравнения моделей рельефа от двух независимых обработок;

– анализ и контроль качества обработки батиметрических профилей и определение положения точек ПКС в ПО Geocap;

– сравнительный анализ изменения положения точек ПКС в зависимости от выбора различных размеров регулярной ячейки цифровой модели рельефа дна и применения интерполяционных методов в ПО Geocap.

Основные результаты по оценке качества батиметрической съёмки и предварительно обработанных данных следующие:

– средняя величина СКП глубины по результатам анализа пересечений полос покрытия для всех профилей составила 0,22 % от глубины;

– минимальная СКП глубины – 0,10 %;

– максимальная СКП глубины – 0,55 %.

Таким образом, погрешность определения глубины 2500 м составила: 2500×0,22 % = 5,5 м (68 %).

Стандарт МГО предполагает оценку точности на уровне 95 % доверительной вероятности, тогда имеем: 5,5×1,96 = 10,8 м (95 %).

Допустимая погрешность определения глубины 2500 м в соответствии со Стандартом МГО S-44 (2008) = 57,5 м (95 %). Следовательно, качество съёмки во время экспедиции 2019 г. превосходит требование Стандарта в 5 раз.

Анализ всех данных позволяет утверждать, что с точки зрения качества батиметрическая съёмка на всех плановых профилях выполнена точно, правильно и надежно, т. е. случайные погрешности сведены к минимуму, систематические погрешности эффективно компенсированы введенными поправками по результатам калибровки, а грубые погрешности не допущены.

Таким образом, батиметрические модели рельефа, созданные в результате выполненных измерений, являются достоверными и могут быть применены для последующей интерпретации с целью формирования национального Представления на расширенный континентальный шельф в СЛО в соответствии Статьей 76 Конвенции по морскому праву.

На основании визуального анализа трехмерных отображений цифровых моделей рельефа, полученных в ходе двух независимых обработок данных многолучевой съёмки, а также по результатам сравнения батиметрических профилей по данным моделям и предварительного положения возможных точек ПКС в ПО Geocap, можно сделать вывод о достаточно высоком (без систематических ошибок) качестве полученных данных.

Принимая во внимание тяжелые ледовые условия в северном районе работ, увеличение скорости судна для прохождения торосов, а также сложную форму рельефа дна, получение непрерывной записи высокого качества не представлялось возможным.

В ходе работ предпринимались попытки минимизации «разрывов» в батиметрических данных на профилях северного участка (PR-08, PR-09, PR-10, PR-11). Анализ предварительных моделей показал, что критичных «пропусков» в данных нет, все «разрывы» могут быть устранены в ходе дальнейшей обработки с применением анализа WCD (Water Column Data) или интерполяционными методами.

На основе независимой обработки и анализа отрядом контроля качества данных непрерывного сейсмоакустического профилирования высокой и низкой частоты были сделаны следующие выводы:

– в целом по площади материалы акустических исследований рельефа дна в области как ВЧ, так и НЧ, соответствуют требованиям проекта и пригодны для дальнейшего анализа;

– сравнительный экспресс-анализ данных АП ВЧ и АП НЧ показывает, что оба метода дают информативные, кондиционные данные, дополняющие друг друга как в отношении разрешающей способности, так и в отношении проникающей способности;

– комплекс мероприятий по контролю качества, выполнявшийся на всех этапах работ, и оценка качества результатов работ позволяют утверждать, что все собранные и предварительно обработанные данные соответствуют требованиям проекта и пригодны для последующей окончательной обработки и анализа.

Таким образом, все задачи экспедиции «Арктика-2019», определённые техническими заданиями в части получения высококачественной первичной батиметрии, сейсмоакустической и гравиметрической информации, необходимой для

решения задачи по включению в состав ВГКШ РФ хребта Гаккеля, были выполнены АО «ГНИНГИ» и его субподрядчиками в полном объеме. Данные, полученные в ходе этой экспедиции, и результаты их обработки отвечают требованиям Научно-технического Руководства (НТР) Комиссии ООН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Научно-техническое Руководство Комиссии по границам континентального шельфа (принято пятой сессией Конвенции Организации Объединенных Наций по Морскому праву CLCS 3–14 мая 1999 г., Нью-Йорк) (официальный перевод на рус. язык). – 90 с.
2. Training Manual for Delineation of the Outer Limits of the Continental Shelf Beyond 200 Nautical Miles for Preparation of Submissions to the Commission on the Limits of the Continental Shelf // Division for Affairs and the Law of the sea; Office of Legal Affairs. – United Nations Publication, New York, 2006. – 632 p.
3. Международная Конвенция по морскому праву 1982 г. Конвенция Организации Объединенных Наций по морскому праву (подписана 10 декабря 1982 г., вступила в действие 16 ноября 1994 г.). – М.: «Военное издательство», 1985. – 224 с.
4. IBCAO Version.2.23 created March 8, 2008 – URL: https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/ibcaoversion2.html.
5. Сайт ООН. Continental Shelf Submission of Norway in respect of areas in the Arctic Ocean, the Barents Sea and the Norwegian Sea. Executive Summary. URL: https://www.un.org/depts/los/clcs_new/submissions_files/nor06/nor_exec_sum.pdf. Дата обращения 20.06.2020.
6. Константинов Ю. Б., Грачев К. И. Высокоширотные воздушные экспедиции «Север» (1937, 1941–1993 гг.). – СПб, Гидрометеоиздат: 2000. – 176 с.
7. Сайт ООН. The Icelandic Continental Shelf Partial Submission to the Commission on the Limits of the Continental Shelf pursuant to article 76, paragraph 8 of the United Nations Convention on the Law of the Sea in respect of the Ægir Basin area and Reykjanes Ridge. URL: https://www.un.org/depts/los/clcs_new/submissions_files/isl27_09/isl2009executivesummary.pdf.
8. Сайт ООН. Partial Submission of the Government of the Kingdom of Denmark together with the Government of Greenland to the Commission on the Limits of the Continental Shelf The North-Eastern Continental Shelf of Greenland. URL https://www.un.org/depts/los/clcs_new/submissions_files/dnk68_13/DNK2013_ES.pdf.
9. EM122 multibeam echo sounder. Product description // Kongsberg Maritime AS 302440/E. – Norway, 2011. – 52 p. – URL: ftp://nic2b.whoi.edu/pub/em122/302440ad_em122_product_description.pdf.
10. Нарышкин Г. Д., Фридман Б. С., Алексеев С. П., Костенич А. В. Решение проблемы делимитации Арктического бассейна по результатам гидрографических исследований // Арктика: экология и экономика. – 2011. – № 3. – С. 36–47.
11. Ашик И. М., Зеньков А. Ф., Костенич А. В. Основные итоги экспедиции по определению и обоснованию внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане в 2010 году // Российские полярные исследования. – 2010. – № 2. – С. 19–23.
12. Алексеев С. П. , Зеньков А. Ф. , Курсин С. Б. , Ставров К. Г. Батиметрические исследования ОАО «ГНИНГИ» в центральной части Арктики // Навигация и гидрография. – 2010. – № 30, – С. 43–49.
13. Фирсов Ю. Г., Баландин В. Н., Меньшиков И. В. К вопросу качества батиметрической съемки Северного Ледовитого океана в интересах определения внешней границы континентального шельфа России // Геодезия и картография. – 2010. – Вып. 2. – С. 28–33.
14. Ставров К. Г., Костенич А. В. , Червякова Н. В., Пирогова Е. А., Кибиткина Ю. М., Жилин Д. М. Возможности получения качественной информации многолучевым эхолотом EM-122 в ледовых условиях // Навигация и гидрография. – 2011. – № 32. – С. 43–49.
15. Ледовских А. А., Морозов А. Ф., Глумов И. Ф., Казмин Ю. Б., Алексеев С. П., Добротворский А. Н., Зеньков А. Ф., Костенич А. В., Ставров К. Г. Гидрографические и геофизические исследования для обоснования внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане // Труды VII Российской научно-технической конференции «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности» («НГО-2011») , 18–20 мая 2011 г. – СПб., 2011. – С. 43–50.

16. Жилин Д. М. , Костенич А. В. Постобработка результатов системы позиционирования съёмки рельефа дна для определения ВГКШ // Труды VII Российской научно-технической конференции «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности» («НГО – 2011») , 18–20 мая 2011 г. – СПб., 2011. – С. 89–92.
17. Жилин Д. М. , Зеньков А. Ф. , Костенич А. В. Особенности работы комплекса ГМЛЭ ЕМ-122 – НГЭС «Академик Федоров» в различных ледовых условиях // Труды VII Российской научно-технической конференции «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности» («НГО – 2011»), 18–20 мая 2011 г. – СПб., 2011. – С. 412–413.
18. Алексеев С. П. , Зеньков А. Ф. , Глазко В. В. Комплексные гидрографо-геофизические исследования второго этапа работ по определению и обоснованию внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане // Навигация и гидрография. – 2011. – № 32. – С. 31–38.
19. Алексеев С. П. , А. Ф. Морозов, Глумов И. Ф. и др. Комплексные гидрографические и геофизические исследования для обоснования внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане // Тезисы докладов Всемирной морской технологической конференции, 29 мая – 1 июня 2012. – СПб, 2012.
20. Ставров К. Г. , Костенич А. В. , Нарышкин Г. Д. и др. Обработка результатов дополнительных гидрографических работ по определению внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане // Тезисы докладов Всемирной морской технологической конференции, 29 мая –1 июня 2012, – СПб, 2012.
21. Костенич А. В., Кытманов Д. Н., Никитина Д. А. Пирогова Е. А., Ставров К. Г. Визуализация материалов многолучевой съёмки рельефа дна в Северном Ледовитом океане в проектах ArcGIS и GeoCAP // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб, «Нестор-История», 2014. – С. 457–459.
22. Каврайский А. В., Костенич А. В. Оценка погрешности определения географического положения подножия континентального склона по батиметрическим данным // Навигация и гидрография. – 2016. – № 46. – С. 45–56.
23. Seapath 330]: data sheet // Kongsberg Maritime AS. – Norway, 2014. – 2 p.
24. HIPS and SIPS 7.0 Service Pack 2, [Text]: User Guide//CARIS-Canada, 2011. – 826 p.
25. Жилин Д. М. , Костенич А. В. , Пирогова Е. А., Усольцева Е. А. Методика и некоторые результаты определения вертикального разреза скорости звука в воде в экспедиции «Шельф-2010» // Труды VII Российской научно-технической конференции «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности» («НГО – 2011»), 18–20 мая 2011 г. – СПб., 2011. – С. 518–522.
26. Костенич А. В., Пирогова Е. А., Ставров К. Г. Результаты гидрологических исследований в экспедициях по программе «Определение и обоснования внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане» в 2010–2011 годах // Тезисы докладов Всемирной морской технологической конференции, 29 мая –1 июня 2012, – СПб, 2012.
27. Костенич А. В., Кибиткина Ю. М. Съёмка рельефа дна профилографом Topas 18 в ходе выполнения высокоширотной экспедиции 2010 года // Труды VII Российской научно-техническая конференции «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности» («НГО – 2011») , 18–20 мая 2011 г. – СПб., 2011. – С. 409–411.

COMPREHENSIVE RESEARCH IN THE ARCTIC OCEAN IN 2019

V. Yu. Bakhmutov, E. V. Kolobov, A. V. Kostenich, N. V. Chervyakova («GNINGI» JSC)**, D. M. Zhilin** («Admiral Makarov SUMIS»)

The main tasks and results of comprehensive research carried out under the guidance and with the participation of specialists of the State Research Navigation-Hydrographic Institute in the interests of substantiating the Outer limit of the continental shelf of Russia in the Arctic are considered. For the first time in world practice, a specific set of studies has been applied in severe ice conditions, including, in addition to surveying the seabed topography and gravimetry, a seismoacoustic deep method for studying underlying near-surface sediments.

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 528.92

ОСОБЕННОСТИ ПРИЛИВНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ОТКРЫТЫХ АКВАТОРИЯХ

Ю. Н. ЖУКОВ, Е. В. ФЕДОРОВА
(ФГБУ «ГОИН»)

В статье представлены основные терминологические понятия и свойства приливов. Описаны свойства пространственно-временной кинематики приливов на открытых акваториях. Обоснована необходимость разработки методов учета распределения приливных колебаний на открытых акваториях в гидрографии и технологической деятельности в прибрежной зоне морей.

Освоение шельфа арктических морей актуализирует информационное обеспечение, связанное с уровнем моря. Технологическая деятельность в прибрежных районах требует совершенствования картографической и океанографической информации. Приливы являются одним из основных океанографических явлений, информация о которых широко используется в обеспечении работ на шельфе.

Промерные гидрографические работы, строительство морских сооружений нефтяной и газовой промышленности, производство дноуглубительных работ проводятся на шельфе с использованием информации о приливном уровне на акватории. Очевидно, что эффективность применения документов, определяющих учет и влияние приливов в технологической деятельности, напрямую зависит от того, насколько корректно в этих документах учитывается пространственно-временная изменчивость приливных колебаний на акватории морей. Однако на примере анализа документов [1–4] выясняется, что пространственно-временная изменчивость приливных колебаний уровня моря на акватории, где производятся работы, абсолютно не учитывается. В этих документах приливы рассматриваются не как пространственно-временное явление, а только как колебательный процесс в некоторой точке. Например, наиболее значимый в информационном отношении метод «Расчет пределов действия уровенных постов» в документе [1] использует только представления о свойствах приливных колебаниях уровня в точке. В указанных документах нет даже намека на то, что пространственно-временное распределение приливных колебаний имеет сложный специфический характер. Более того, в документах отсутствует метод расчета поверхности теоретического нуля глубин (ТНГ) для акватории, как известно ТНГ является основным критическим параметром для безопасности мореплавания, от ТНГ идет отсчет глубин на навигационных картах. Используется только метод расчета наинизшего теоретического уровня (НТУ) в точке. Однако еще А. И. Дуванин в своей книге [5]

посвятил целую главу описанию того факта, что поверхность ТНГ на акватории резко отличается от значений НТУ на береговых постах.

Главные свойства и характер пространственно-временного распределения приливных колебаний на акваториях морей и океанов уже известны в океанографии более ста лет. Приведем основные сведения об известных свойствах приливов на акваториях. Обзор дадим в неформальном виде. Это, возможно, послужит источником совершенствования документов (существующих и будущих), определяющих учет приливов в технологической деятельности на шельфе морей.

Приливы – это явление, связанное с пространственно-временными изменениями уровня поверхности моря под влиянием изменчивости гравитационного поля Земли, вызванного Солнцем и Луной. Свойства пространственно-временных изменений приливного уровня существенно отличаются от подобных свойств других поверхностных волн: ветровых (зыби) и цунами.

Основой описания любых пространственно-временных изменений уровня моря служит описание его колебаний – временного процесса изменения уровня в фиксированной точке акватории [6]. В свою очередь, процесс колебания описывается двумя параметрами – амплитудой и фазой колебаний. Для простого гармонического колебания изменение уровня моря $h(t)$ во времени t относительно среднего значения уровня можно представить виде:

$$h(t) = A\cos(\omega t + \varphi), \tag{1}$$

где A – амплитуда колебаний, $\phi = (\omega t + \varphi)$ – фаза колебаний, φ – начальная фаза (равная фазе колебания в момент времени $t = 0$), ω – угловая частота. Реальные приливные колебания в точке более сложные. Для них временной ход уровня выражается через амплитуду и фазу как некоторые сложные функции, зависящие от времени [7]:

$$h(t) = A(t)\cos(\phi(t)). \tag{2}$$

Процесс колебаний наиболее полно описывается на фазовой плоскости, которая является плоскостью с прямоугольной системой координат (рис. 1), где ось абсцисс – величина уровня моря $h(t)$ и ось ординат – скорость изменения уровня dh/dt. Фаза определяется как состояние приливного уровня в фиксированный момент времени и является более информативным параметром, чем амплитуда.

На рис. 1 показано, что фаза колебания ϕ – это монотонно неубывающая функция от времени *t.*

Приливные колебания представляют собой почти-периодическую функцию, то есть функцию, значения которой приближенно повторяются при добавлении к аргументу надлежащим образом выбранных постоянных (почти периодов). Свойство почти-периодичности приливных колебаний следует из того, что между любыми двумя угловыми скоростями астрономических элементов, определяющих частоты приливных колебаний, не выполняется рациональное отношение. В тоже время в гармоническом анализе приливные колебания аппроксимируют конечной суммой косинусов с угловыми частотами, представляющих целочисленную комбинацию

угловых скоростей астрономических элементов: скорости вращения Земли, скорости изменения долготы Луны, Солнца и т. д. Поэтому предвычисленные приливные колебания являются квазипериодическими функциями [8], которые относятся к подклассу почти-периодических функций.

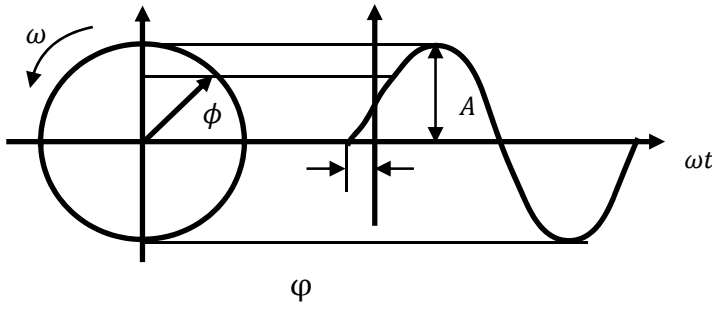


Рис. 1. Иллюстрация к определению параметров амплитуды и фазы гармонического колебания в точке акватории. Слева – фазовый портрет, справа – временной ход гармонического колебания поверхности уровня моря

Предвычисленные приливные колебания уровня моря в точке, где проводились уровненные наблюдения и проведен их гармонический анализ, описывают колебания чрезвычайно точно. В гидрометеорологии нет других процессов, которые бы предвычислялись на сотни лет вперед, кроме приливных колебаний. Но с описанием пространственно-временного распределения приливных колебаний дело обстоит гораздо сложнее.

Наша задача рассмотреть, как изменяются амплитуды и фазы приливных колебаний в различных точках морей и океанов, привести способы описания изменчивости и её специфические свойства. Особенность свойств изменчивости приливов покажем путем сравнения со свойствами поверхностных волн. Будем описывать пространственно-временное распределение колебаний с помощью полей амплитуд и фаз колебаний. Поле амплитуд описывается с помощью изоамплитуд – положением линий равных значений амплитуд за некоторый интервал времени (больше периода). Поле фазы описывается с помощью изофаз – положением линий равных значений фаз в фиксированный момент времени. Заметим, что при описании пространственно-временного распределения колебаний уровня моря главным является не поле амплитуды, а поле фазы колебаний.

Кратко перечислим известные свойства поверхностных волн [9].

Волны на поверхности моря являются поперечными волнами с характерным наличием параллельности пространственного расположение изофаз (рис. 2). Для волн свойственно иметь форму поверхности с явно выраженными гребнями и ложбинами. Изофазы волн нигде не пересекаются, т. е. поле изофаз не имеет особенностей. Для волн значения амплитуд везде одинаковы, поэтому линии изоамплитуд невозможно изобразить.

Для описания поля фазы колебаний наиболее важной характеристикой является понятие фазовой скорости $\mathcal{V}$ – скорости перемещения постоянного значения фазы колебательного движения вдоль заданного направления по пространству. Заметим, что понятие фазовой скорости не имеет никакого отношения к понятию «скорости

материальной точки». Фазовая скорость не связана с переносом массы, поэтому она в принципе может быть бесконечной. Фазовая скорость – это чисто кинематическое понятие, то есть понятие, не связанное с какими-либо силами.

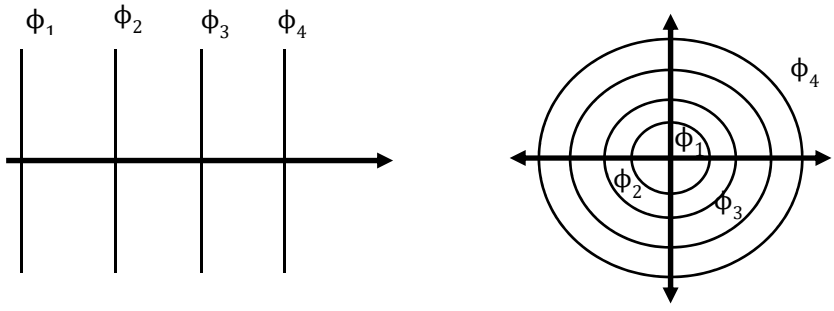


Рис. 2. Схема пространственного распределения изофаз в распространяющихся волнах: слева – в поле плоских волн (например, зыби), справа – в поле сферических волн (например, цунами). Стрелками обозначено направление распространения

Поверхностные волны обладают дисперсией – свойством, определяющим разную фазовую скорость для различных длин волн. Дисперсия приводит к тому, что набор волн (цуг) претерпевает изменения формы (диспергирует) по мере их распространения.

Закон дисперсии для волн на воде выражается в виде зависимости пропорциональности ($\sim$) фазовой скорости υ волны от глубины H:

$$\upsilon \sim H . \qquad (3)$$

Закон дисперсии приводит к некоторым явлениям, которые можно легко заметить на морском берегу:

– рефракции – свойству разворачивания изофаз (гребней) волн параллельно берегу. Даже если волна в открытом море шла под углом к берегу, то при выходе на берег гребни волны имеют тенденцию разворачиваться параллельно ему. Это связано с тем, что вблизи берега, когда глубина начинает постепенно уменьшаться, фазовая скорость волны падает (рис. 3);

– уменьшению длины волны с возрастанием её высоты (рис. 3), что в конечном итоге приводит к разрушению волны – разрывам в поле фазы и амплитуды волны.

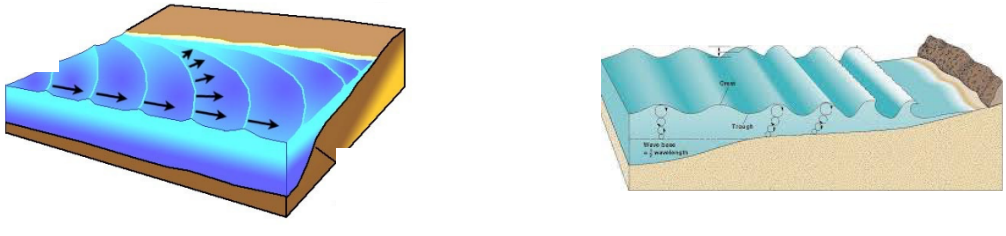


Рис. 3. Иллюстрации к понятию рефракции (слева) и дисперсии (справа) поверхностных волн

Каковы же свойства пространственно-временного распределения приливных колебаний?

Сделаем необходимое замечание. Свойства пространственно-временного распределения приливных колебаний настолько отличаются от свойств волн, что авторы не могут использовать сочетание «приливные волны». Для краткости далее вместо сочетания «пространственно-временное распределение приливных колебаний» будем использовать сочетание «распределение приливных колебаний».

Обе теории приливов – и статическая, описанная в 1740 году Даниилом Бернулли (обычно приписываемая Ньютону) [10], и динамическая Лапласа – давали только теоретическое толкование приливных колебаний и не предлагали никаких новых практических методов – ни предвычисления приливных колебаний в точке, ни методов описания реального распределения приливных колебаний в морях и океанах [11]. Гармонический анализ приливных колебаний по измерениям уровня моря в некоторой точке был изобретен в последней четверти XX века лордом Кельвином и Джорджем Говардом Дарвином, а за полвека до этого было совершено историческое открытие в области изучения приливов – первое корректное описание распределения приливных колебаний на акватории.

Реальную кинематику распределения приливных колебаний открыл в 1836 г. английский исследователь У. Уэвелл [12]. Сделал он это путем обработки множества прямых береговых наблюдений за уровнем Северного моря. На рис. 4 представлена первая в мире карта, созданная Уэвеллом – прообраз современных приливных карт. На приливных картах отображаются линии изофаз, выраженные в часах приливного цикла, и линии высот прилива. На карте Уэвелла впервые в истории человечества были отображены амфидромические точки, в которые сходятся изофазы приливных колебаний. В амфидромических точках прилив отсутствует. Открытие Уэвелла было подтверждено специально организованной для этого морской экспедицией в 1840 г. Сейчас это открытие входит в тройку великих исторических открытий в области особенностей волн [13].

Заметим, что теории приливов – ни статическая, ни динамическая – не предполагали наличие амфидромических точек в распределении приливных колебаний. Думается, что именно это обстоятельство вызвало резкое неприятие учеными открытия амфидромических точек. В середине XIX в. было опубликованы несколько работ известных ученых о невозможности этого явления, в результате чего открытие амфидромических точек было «забыто» до конца XIX в. Только в начале XX в. идея амфидромических систем была возрождена, но в явно искаженном виде. Вместо приливных карт для реального распределения приливных колебаний стали строить приливные карты для отдельных основных гармоник (M2, S2, K1, O1). К настоящему времени такие приливные карты построены почти для всех акваторий Мирового океана. К сожалению, несмотря на то, что прошло уже почти двести лет с момента открытия амфидромических точек и прилитых карт, описывающих распределение приливных колебаний, в гидрографии это осталось незамеченным, а документы, определяющие учет и влияние приливов в технологической деятельности на шельфе морей, не учитывают эту особенность распределения приливных колебаний.

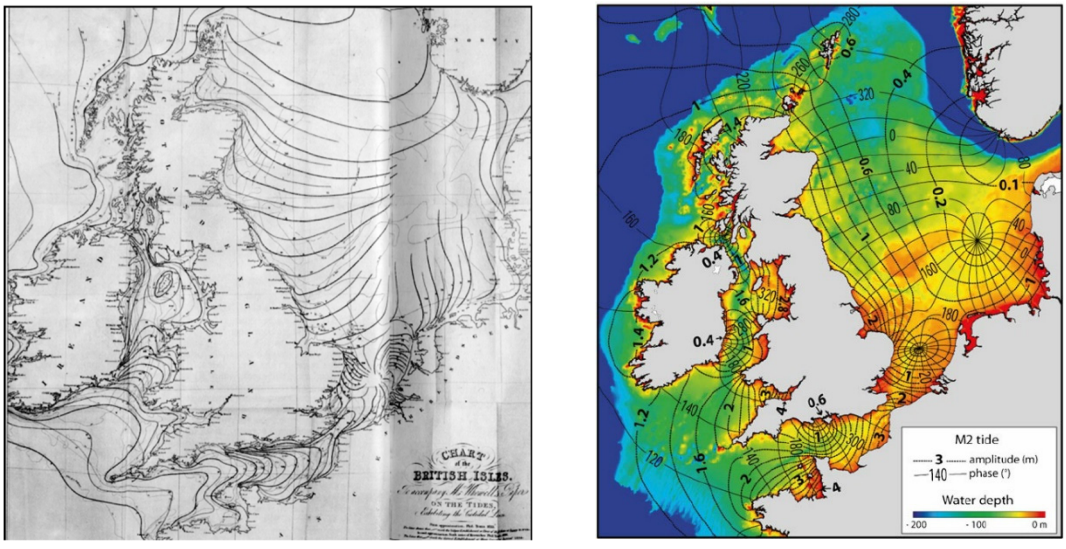


Рис. 4. Примеры приливных карт. Слева карта – приливных изофаз Уэвелла [12], справа – современная приливная карта Северного моря для приливной гармоники M2 [14]

Главной особенностью распределения приливных колебаний является наличие амфидромических точек в поле фаз приливных колебаний. Механизм образования амфидромической точки можно качественно описать следующим образом. Вектор приливных сил с началом в некоторой точке эквипотенциальной поверхности океана описывает сложную эллипсовидную траекторию, пересекающую поверхность [15]. Эквипотенциальная поверхность – невозмущенная приливными силами поверхность океана. Величины векторов сил малы, их изменения во времени и в пространстве происходят медленно. Поверхность океана стремится минимизировать свою потенциальную энергию в поле приливных сил, принимая перпендикулярное положение к векторному полю приливных сил. Поверхность синхронизируется с изменениями приливных сил, и водные массы движутся как «твердое тело», совершая подобие вращательных колебаний [16] (рис. 5). Такое движение водных масс характеризуется тем, что в центральной области какой-либо акватории поверхность остается на одном постоянном уровне, а величина колебаний уровня увеличивается по направлению к периферии акватории.

Точка поверхности акватории, которая испытывает нулевые изменения по высоте, называется амфидромической точкой. Однако свойство нулевого изменения уровня не является свойством, определяющим эту точку. Действительно, на Земном шаре существует много точек в водоемах, в которых уровень не изменяется во времени. Например, в некотором озере поверхность воды не изменяется во всех точках, однако это не означает, что на поверхности озера много амфидромических точек. Специфическим (характеристическим) свойством, определяющим амфидромическую точку, является свойство отсутствия фазы приливных колебаний в этой точке. Определяется это тем, что все фазы колебаний, а это множество вещественных чисел в интервале $[0,2\pi)$, сходятся в амфидромической точке. Таким образом, в ней должны присутствовать одновременно все значения из интервала

$[0,2\pi)$, а это логическое противоречие. Логично то, что для амфидромической точки понятие фазы колебаний неприменимо, в ней фазы колебаний не существует. То, что в амфидромической точке амплитуда равна нулю, – это следствие отсутствия в ней фазы. Фаза отсутствует только в амфидромической точке. Во всех других точках акваторий фаза существует и амплитуды не нулевые. Схема распределения изофаз и изоамплитуд на акватории с амфидромической точкой представлена на рис. 6.

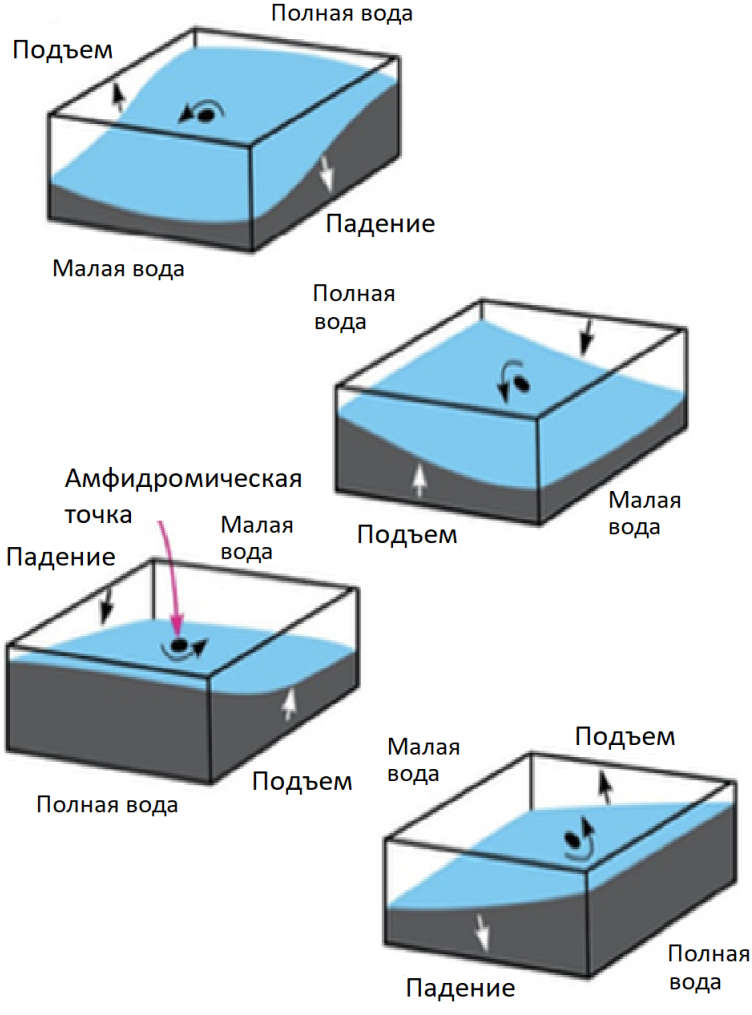


Рис. 5. Схема колебания массы воды как «твердого тела» и положение амфидромической точки

Здесь следует обратить особое внимание на изменение фазовой скорости в поле приливных фаз. Фазовая скорость равна нулю в амфидромической точке и по направлению изофазы (рис. 6) и максимальна в перпендикулярном направлении к изофазе. Причем чем дальше точка изофазы от амфидромической точки, тем больше становится фазовая скорость в перпендикулярном направлении, например, так, как увеличивается расстояние между смежными изофазами.

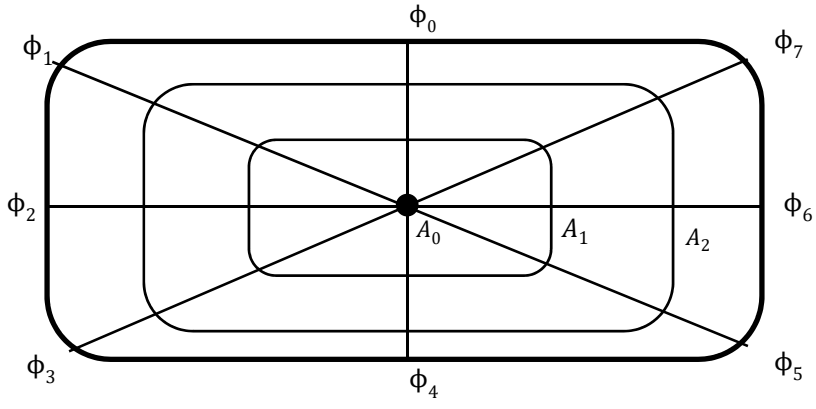


Рис. 6. Приливная карта для схемы, показанной на рис. 5. Радиальные линии – изофазы, пунктирные – изоамплитуды, внешний контур – береговая черта

Кроме наличия амфидромических точек, распределение приливных колебаний обладает еще рядом характеристических свойств. Изофазы веером выходят из амфидромической точки и заканчиваются границей акватории – береговой линией. Причем изофазы подходят к береговой линии под прямым углом. Изоамплитуды образуют замкнутые линии с центром в амфидромической точке. Изофазы и изоамплитуды пересекаются под прямым углом. Поля приливных фаз и амплитуд непрерывны и гладки, т. е. не имеют разрывов. Амфидромическая точка всегда является изолированно точечной особенностью поля приливных фаз [7].

Для различения полей фаз приливов и поверхностных волн введем понятие «индекса вращения» точки X в поле фазы. Возьмем простую замкнутую линию, например, окружность. Зададим положительное направление ее обхода – против часовой стрелки. Определим величину индекса вращения точки X как изменение фазы по контуру окружности с центом в точке X. Когда амфидромическая точка лежит вне окружности с центром в точке X, изменение фазы по контуру окружности равно нулю, и величина индекса точки X равна нулю. Когда амфидромическая точка находится внутри окружности с центром в точке X, изменение фазы по контуру окружности равно 2π (либо кратно 2π), и величина индекса точки X равна 2π (либо кратно 2π). Кратность 2π следует из свойства гладкости поля фазы, в противном случае в поле фазы существовал бы разрыв. Определим знак «индекса вращения» точки X в поле фазы. Знак индекса вращения положителен, если увеличение фазы совпадает с направлением обхода, в противном случае – отрицательным. Таким образом, индекс вращения амфидромической точки, находящейся в центре окружности обхода, всегда равен 2π (либо кратен 2π) с учетом знака.

Очевидно, что в поле фаз поверхностных волн индекс вращения для всех точек равен нулю, так как в поле фаз нет амфидромических точек. Таково коренное отличие поверхностных волн от распределения приливных колебаний на акваториях.

Другим свойством распределения приливных колебаний, не имеющим аналога для поверхностных волн, является отсутствие локальных максимумов в поле амплитуд, что следует из наличия амфидромических точек. Обоснуем данное свойство.

Заметим, что площадь поверхности акватории остается практически постоянной за приливной цикл. В случае отсутствия возмущений гравитационного поля площадь поверхности океана была бы в уравновешенном состоянии – повторяла форму эквипотенциальной поверхности, соответствующей постоянному полю ускорения силы тяжести $g = 9{,}8$ м/с^2. В этом случае площадь поверхности Мирового океана S минимальна. При наличии приливных сил поверхность океана равна S_1. Покажем, что $S_1 \cong S$. Действительно, приливные силы в миллион раз меньше g, площадь океана под их действием меняется в основном за счет изменения положения береговой черты, то есть площади осушек $s = |S_1 - S|$. Однако площадь приливных осушек s пренебрежимо мало по сравнению с самой площадью S. Следовательно $S_1 \cong S$, то есть S_1 можно считать минимальной поверхностью. Известно [17], что минимальная поверхность имеет среднюю нулевую кривизну для всех точек поверхности. Поэтому на акваториях не могут возникать локальные области с большими амплитудами колебаний, чем в соседних областях, а, следовательно, на приливных картах не могут наблюдаться замкнутые изоамплитуды. Иллюстрация приведена на рис. 7.

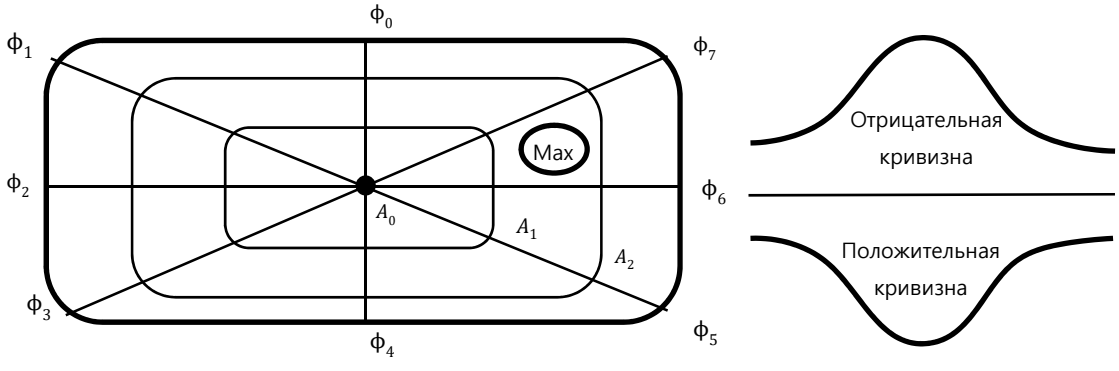


Рис. 7. Иллюстрация ненулевой средней кривизны уровня моря в области с локальным максимумом амплитуды. Слева на схеме приливной карты жирной пунктирной окружностью обозначена изоамплитуда локального максимума. Справа даны графики изменения уровня на всяком отрезке, лежащем в окружности; вверху – при подъеме уровня, внизу – при падении уровня. Следовательно, средняя кривизна по множеству отрезков, лежащих внутри окружности, равна практически всегда не нулевому значению

Из указанных характеристических особенностей приливного поля фаз вытекают свойства, отличные от перечисленных выше свойств поверхностных волн.

Скорость приливных фаз υ не зависит от глубины места H, так как линии изофаз не сгущаются над мелководьем акваторий (рис. 4). Поэтому у распределения приливных колебаний отсутствует свойство дисперсии, а значит, и рефракции. У берегов приливы не разрушаются. Понятия гребня и подошвы неприменимы к распределению приливных колебаний, так как в поле приливных фаз отсутствует параллельность изофаз. Следовательно, понятие длины волны для приливов неприменимо.

Коснемся описания распределения приливных колебаний на акватории Мирового океана. Распределения приливных колебаний в Мировом океане определяются множеством факторов. Сложная форма береговой линии материков и островов, задающая форму акваторий отрытого океана и внутренних морей, приводит к тому, что приливные колебания на акваториях зависят не только от непосредственного действия вынуждающих приливных сил, но и от сил, индуцированных приливными колебаниями вод в смежных акваториях. Оказывает влияние сила Кориолиса. Кроме того, сами приливные колебания являются следствием перемещения больших масс вод акватории, которые, в свою очередь, индуцируют вариации гравитационного поля и возмущают приливные силы. Поэтому распределения приливных колебаний в Мировом океане характеризуется чрезвычайно сложной кинематикой. На рис. 8 приведена приливная карта M2 для Мирового океана, представляющая собой результат компьютерного моделирования приливов. На ней показаны амфидромические точки (красные точки) и знак их индекса вращения (фиолетовый – по часовой стрелке, зеленый – против часовой стрелки). Красные линии – линии изофаз, соответствующие 0, 3, 6 и 9 лунных часов после прохождения Луны через меридиан Гринвича; закрашенный сектор фиолетового и зеленого кружков указывает сектор между 0 и 3 лунными часами. Синие цифры показывают амплитуду прилива M2 в метрах.

Весь Мировой океан с внутренними морями покрыт кластерами амфидромических систем – участками акваторий, приливные колебания на которых определяются некоторой амфидромической точкой. В открытом океане наблюдаются «стационарные» амфидромические точки – малоподвижные, постоянно существующие амфидромические точки (рис. 8).

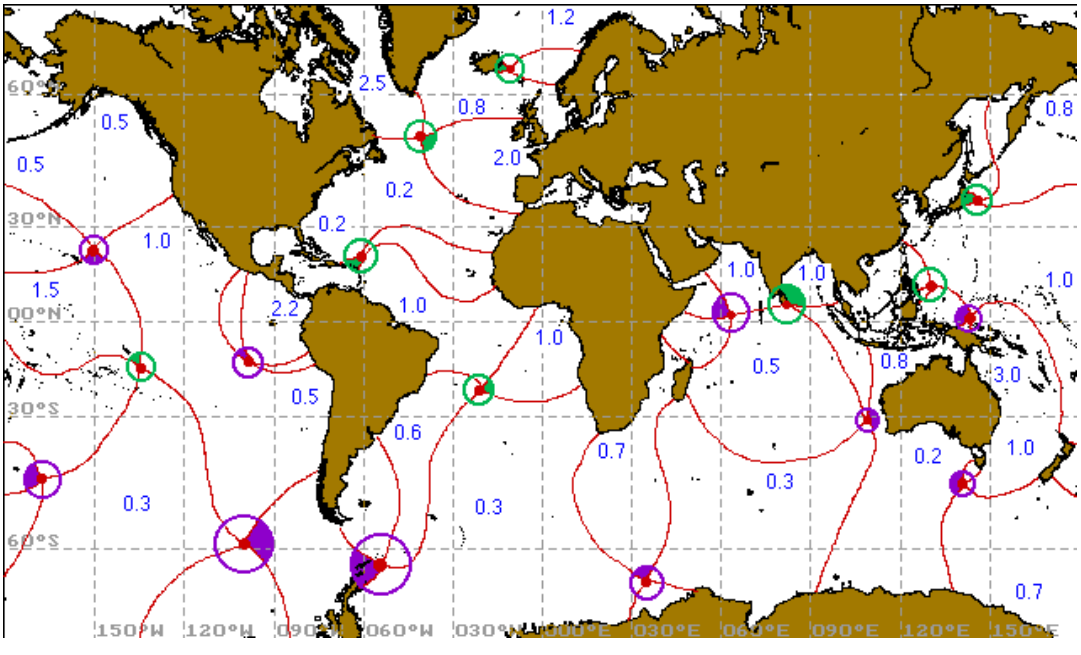


Рис. 8. Географическое положение амфидромических точек в Мировом океане приливной гармоники M2 [18]

Во внутренних морях могут присутствовать как стационарные, так и динамические амфидромические точки. Динамические амфидромические точки перемещаются по акватории, возникают и исчезают в зависимости от астрономических условий. Амфидромические точки возникают у берега и перемещаются внутрь акватории. Исчезают амфидромические точки у берега или аннигилируют при сближении с другой амфидромической точкой [7]. Динамические амфидромические точки в Мировом океане – это механизм сглаживания возможных разрывов в поле приливных фаз.

Мы показали, что приливы отличаются от поверхностных волн, которые являются распространяющимися волнами, теперь следует показать, что приливы отличаются от стоячих волн – сейш.

Пространственно-временное поле сейш описывается распределением фаз и амплитуд, представленных на рис. 9. Линии, где амплитуда и фаза колебаний равна нулю, в океанологии принято называть узловыми линиями. Акватория со стоячими волнами делится узловыми линиями на ячейки. Внутри каждой ячейки колебания уровня происходят синфазно, а колебания в смежных ячейках – в противофазе. Разность фаз колебаний между двумя произвольными точками в области одной ячейки равна нулю. Поэтому линии изофаз изобразить на карте акватории с сейшами невозможно. Амплитуда колебаний в сейшах равна нулю на узловых линиях и максимальна у береговой черты. Положение изоамплитуд и узловых линий в сейшах постоянно.

Узловая линия в сейше не является сингулярной в поле фазы колебаний. В узловой линии фаза существует и равна нулю. Поэтому сейши нельзя отождествлять с приливными колебаниями, они имеют свойства поверхностных волн, за исключением свойства распространения по пространству.

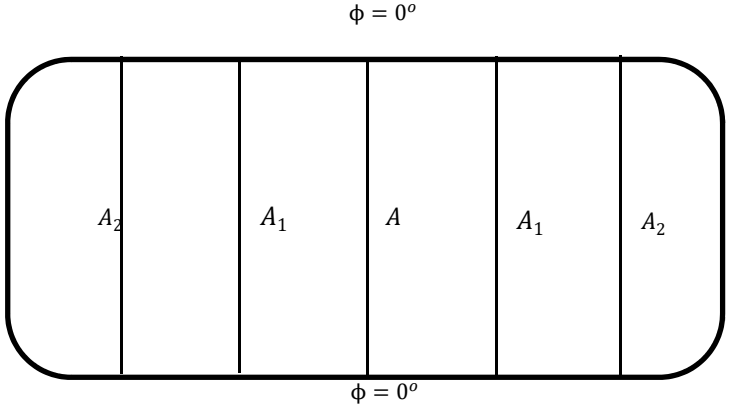


Рис. 9. Схема положения узловой линии и изоамплитуд одноузловой сейши. Внешний контур – береговая черта. Пунктирные линии – изоамплитуды. Сплошная линия – узловая линия сейши, она делит акваторию на левую и правую ячейки, в которых колебания протекают в противофазе, но в каждой ячейке фаза одна и та же

Распределение приливных колебаний в Мировом океане полностью и однозначно описывается приливными картами, на которых отображаются поля амплитуд и фаз приливных колебаний. Наиболее информативным из этих двух полей является поле фаз, которое характеризуется расположением амфидромических точек.

Очевидно, что информация о распределении приливных колебаний на шельфе акваторий морей должна быть включена в методы учета приливных колебаний во всех картографических и технологических работах в прибрежной зоне. Соответствующие методы учета приливных колебаний на открытых акваториях должны быть разработаны и включены в регламентирующие документы.

Однако следует отметить, что существующие приливные карты, рассчитанные для отдельных гармонических постоянных, нельзя использовать с целью построения приливных карт для реального приливного уровня (суммарного уровня). Дело в том, что приливные карты для гармонических постоянных рассчитываются для ограниченного числа гармоник (M2, S2, K1 и O1), тогда как для корректного описания приливных колебаний необходимо до тридцати гармоник. Кроме того, приливные карты для отдельной гармоники даны во времени периода гармоники, следовательно, суммирование их информации некорректно. В настоящее время только метод выявления амфидромических систем, предложенный в диссертации [7], позволяет вычислить распределение приливных колебаний на открытых акваториях.

Можно сделать следующие выводы. Свойства распределения приливных колебаний полностью противоречат свойствам поверхностных и стоячих волн. Приливы не являются подклассом класса поверхностных волн. Сочетание слов «приливные волны» является смешением противоречащих друг другу понятий (оксюморон).

Приливы – это процесс изменения поверхности морей и океанов, характеризующийся наличием амфидромических систем в поле фазы приливных колебаний.

Результаты статьи позволяют разработать эффективные методы учета приливных явлений в технологической деятельности в прибрежной зоне морей и выработать совершенные руководящие документы, регламентирующие учет приливов в гидрографических работах и технологической деятельности на шельфе морей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила гидрографической службы № 4. Съемка рельефа дна. Приложение. – Л.: Издание ГУНиО МО, 1984. – 265 с.
2. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. СП 11-114-2004. – М.: Госстрой России, 2004. – 96 с.
3. Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним. РД 31.74.04 – 2002. – Ростов-на-Дону: Министерство транспорта РФ, 2004. – 161 с.
4. Правила гидрографической службы №35 (ПГС №35). – Л.: Изд. ГУ ВМС, 1956. – 193 с.
5. Дуванин А. И. Приливы в море. – Л.: ГИМИЗ, 1960. – 392 с.
6. Мандельштам Л. И. Лекции по теории колебаний. – М., Наука, 1972. – 470 с.
7. Федорова Е. В. Исследование амфидромических систем на акваториях Горла Белого моря и Амурского лимана. Дисс. на соиск. уч.ст. к.г.н. – М.: ГОИН, 2003. – 140с.
8. Левитан Б. М. Почти-периодические функции. – М., ГИТТЛ, 1953. – 396 с.
9. Шокальский Ю. М. Океанография. – Л.: ГИМИЗ, 1959. – 537 с.
10. Байнум У. Краткая история науки. – М.: Эксмо, 2012. – 384с.
11. Уэвелл У. История индуктивных наук от древнейшего до настоящего времени. – 2 т. – СПб: Рус. кн. торговля, 1867. – 870 с.
12. Whewell W. Researches on the Tides. Phylosophical Transactions of the Royal Soc. of London, 1836, 126. – Pp. 289–307.
13. Berry M. Making waves in physics // Nature. – V. 403. – 2000. – P. 21.

14. Reynaud J.-Y., Dalrymple R.W. Shallow-Marine Tidal Deposits // Principles of Tidal Sedimentology, January. – 2012. – Pp. 335–369.
15. Ржонсницкий В. Б. Приливные движения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 244 с.
16. Ревуженко А. Ф. Приливные волны и направленный перенос масс Земли. – Новосибирск: Наука, 2013. – 204 с.
17. Лаврентьев М., Люстерник Л. Основы вариационного исчисления. Том 1. Часть 2. – М.: Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР, 1935. – 400 с.
18. Gerkema, T. An introduction to tides. – Cambridge Univ. Press, 2019. – 222 p.

THE FEATURES OF TIDAL OSCILLATIONS IN OPEN WATER AREAS

Yu. N. Zhukov, E. V. Fedorova (The State Oceanographic Institute)

The article presents the main terminological concepts and properties of tides. The properties of the spatiotemporal kinematics of tides in open water areas are described. The necessity of developing methods for accounting for the distribution of tidal oscillations in open water areas in hydrography and technological activity in the coastal zone of the seas has been substantiated.

УДК 551.589

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ФОРМИРУЮЩИХ ВОЛНЫ ХОЛОДА В Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Ю. В. ЕФИМОВА[1], Я. Б. БАБИЧ[2], Л. О. НЕЕЛОВА[1], Н. С. ЕРЕМИНА[1], А. И. Н. МХАННА[1], И. В. ЛАВРОВА[1,3]
([1] РГГМУ, [2] АНО ДПО «АКАДЕМИЯ ЭТМ», [3] АО «ГНИНГИ»)

В научно-исследовательской работе представлены результаты анализа условий формирования аномально низких среднесуточных температур воздуха в зимний сезон в Санкт-Петербурге за длительный период. Выполнена оценка синоптических ситуаций, сопутствующих значительным похолоданиям в Санкт-Петербурге в зимний сезон. Выявлены особенности изменения вторжения гребня Сибирского антициклона, приводящие к уменьшению повторяемости дней с аномально низкими температурами воздуха в Санкт-Петербурге. В настоящее время ось гребня Сибирского антициклона проходит над акваторией морей Северного Ледовитого океана. Очаги аномального холода в эти дни фиксируются над западной частью Северного Ледовитого океана.

Введение

В последние десятилетия наблюдается увеличение количества зим с неустойчивым термическим режимом, и на этом фоне регистрируется повышение среднесезонной температуры воздуха и уменьшение повторяемости аномально холодных дней за зимние периоды [1]. Изменения климата непосредственно связаны с циркуляционными процессами в тропосфере [1, 2]. Циркуляционные факторы, влияющие на потепление зимнего сезона, приводят к увеличению повторяемости

невских наводнений. Аномально низкие среднесуточные температуры воздуха являются фоновым предиктором для прогноза сильных невских наводнений. [3, 4]

Целью исследования является оценка изменений циркуляционного режима в зимний период, приводящего к уменьшению повторяемости дней с аномально низкими среднесуточными температурами воздуха.

В представленной статье приводятся результаты исследования, направленного на анализ синоптических условий, способствующих формированию аномально низких температур воздуха в Санкт-Петербурге в зимние сезоны. Важное место в работе занимает анализ особенностей изменения циркуляционных процессов, формирующих значительные похолодания в Санкт-Петербурге. Современные климатические изменения являются существенными для Санкт-Петербурга и всего Северо-Западного региона, что подтверждает актуальность представленного исследования.

В данной работе проанализированы синоптические условия формирования аномально низких температур воздуха в Санкт-Петербурге в зимний период за последние сто лет. В качестве исходных данных использован архив среднесуточной температуры воздуха в районе Санкт-Петербурга за период с 1917 года по 2016 г.

Методы исследования

В работе для выявления аномально низких температур воздуха в зимний сезон используется метод квартильных градаций.

Для исследования изменения синоптических условий формирования низких зимних температур применяется синоптический метод анализа, который реализуется на картах реанализа модели *GFS* (Глобальная система прогноза погоды) и *ERA* [5].

Исходные данные по среднесуточным температурам воздуха за период с 1917 по 2016 гг. получены из архива ВНИИГМИ-МЦД [6].

Основные результаты

В результате обработки данных по среднесуточной температуре воздуха в зимний сезон за период с 1917 по 2016 гг., был применен метод квартильных градаций. Выделена граница «значительно ниже среднего» (ЗНС) (значения температуры воздуха -24,4 °С). Все значения среднесуточной температуры ниже данной границы признаются аномально низкими.

В процессе исследования было выявлено 72 случая аномально низких температур.

Январь отличается максимальной повторяемостью дней с аномально низкими температурами (48 случаев). Примечательно то, что после 1987 г. в Санкт-Петербурге зафиксировано только два случая с очень низкой температурой воздуха (один в январе и один в декабре).

В ходе исследования было принято решение разделить дни с аномально низкими температурами на две группы: «единичные» и «волны холода». За исследуемый период выявлено 25 событий, отнесенных к группе «единичных случаев» и 13 событий с характеристиками «волн холода». В табл. 1 представлены все единичные случаи (всего 25 случаев) с температурами значительно ниже среднего, которые наблюдались за весь рассматриваемый период.

Таблица 1

Единичные случаи аномально низкой температуры воздуха в Санкт-Петербурге за период с 1917 по 2016 гг.

№	Год	Месяц	День	Т, °С	№	Год	Месяц	День	Т, °С
1	1918	1	10	-24,5	14	1956	1	26	-26,6
2	1919	12	21	-24,4	15	1966	1	15	-25,1
3	1924	1	26	-27,6	16	1966	2	9	-24,5
4	1933	1	21	-24,9	17	1967	1	30	-25,5
5	1940	2	9	-24,8	18	1968	1	8	-25,4
6	1941	1	25	-25,2	19	1968	1	11	-25,0
7	1942	1	11	-25,0	20	1982	1	9	-25,6
8	1942	1	14	-25,5	21	1985	1	21	-26,5
9	1942	1	21	-25,8	22	1985	1	26	-24,8
10	1942	1	27	-27,6	23	1987	1	29	-25,7
11	1945	12	25	-25,7	24	2002	12	31	-24,5
12	1946	2	8	-27,2	25	2006	1	19	-26,0
13	1955	12	11	-24,6					

Можно сделать вывод, что самое низкое значение среднесуточной температуры воздуха в зимний сезон в Санкт-Петербурге соответствует значению -27,6 °С, Данное значение наблюдалась за исследуемый период два раза: 27.01.1942 и 26.01.1924. Наиболее низкие температуры чаще всего наблюдаются в последней декаде января.

В табл. 2 представлены все случаи «волн холода», которые были зафиксированы за весь рассматриваемый период. Всего было выявлено 13 волн холода, общей продолжительностью 47 дней.

Таблица 2

«Волны холода» в Санкт-Петербурге за период с 1917 по 2016 гг.

Год	Дата начала «волны холода»	Продолжительность волны холода	Минимальная температура, °С	Дата с минимальной температурой
1926	11,01	2	-24,6	11,01
1929	05,02	3	-28,1	07,02
1929	09,02	2	-26,7	10,02
1940	15,01	4	-32,5	17,01
1942	24,01	2	-29,5	24,01
1950	05,01	7	-27,1	05,01
1956	30,01	2	-29,2	31,01
1956	05,02	5	-30,4	06,02
1966	03,02	2	-28,9	04,02
1968	13,01	3	-28,0	13,01
1978	29,12	3	-31,3	30,12
1979	14,02	2	-26,2	14,02
1987	05,01	9	-33,6	10,01

Волна холода в 1987 г. в период с 05 по 14 января определяется как самая длительная в исследуемом периоде. Минимальная среднесуточная температура

воздуха, зафиксированная в этот период составила -33,6 °С, что является самым низким значением в Санкт-Петербурге за сто лет.

Температура воздуха в дни, отнесенные к группе «единичные случаи», не опускалась ниже -27 °С, максимальная повторяемость данной группы (19 единичных случаев из 25 за весь период исследования) наблюдалась до 1968 г.

Дальнейшее исследование циркуляционных условий, сопутствующих дням с аномально низкими температурами, проводилось с применением каталога макросиноптических процессов Г. Я. Вангенгейма – А. А. Гирса [7, 8].

Согласно классификации Г. Я. Вангенгейма все виды атмосферных процессов группируются в три формы атмосферной циркуляции:

– западная (*W*);
– восточная (*E*);
– меридиональная (*C*).

Данные по повторяемости основных форм циркуляции в дни с аномально низкими температурами выглядят следующим образом (рис. 1):

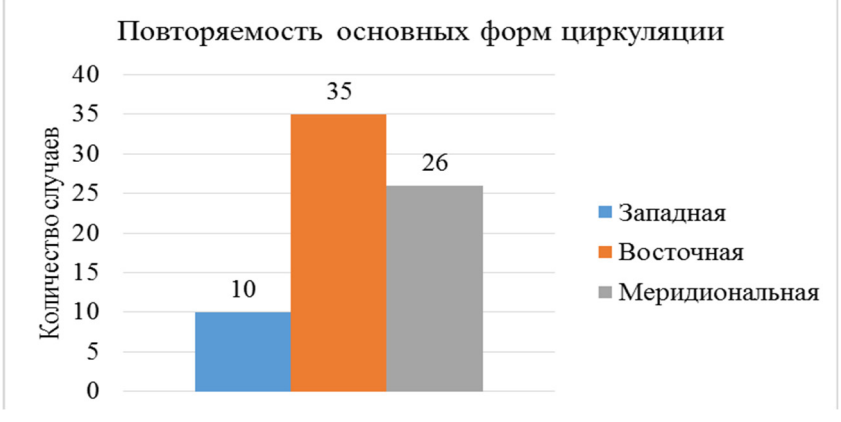


Рис. 1. Повторяемость основных форм циркуляции атмосферы по каталогу Г. Я. Вангенгейма – А. А. Гирса за период с 1917 по 2016 гг.

Восточная форма циркуляции (*E*) характеризуется наличием в тропосфере ведущего потока восточного направления и развитием антициклонов у поверхности земли. Данные барические образования традиционно смещаются на европейскую территорию с северо-востока.

Западная форма циркуляции (*W*) характерна усилением западного переноса во все толще атмосферы, а также отмечающимся зональным смещением циклонов из Атлантического океана на восток.

Меридиональной форме (*C*) соответствуют арктические вторжения [3, 4].

Исходя из представленных на рис. 1 данных, можно сделать вывод, что, в основном, аномально низкие температуры наблюдаются при восточной форме циркуляции, что обычно соответствует распространению Сибирского антициклона. Логично предположить, что уменьшение количества дней с аномально низкими температурами соответствует изменению циркуляционного режима. В связи с этим

было целесообразно проанализировать не только направление движения синоптических объектов в тропосфере, но и конкретные синоптические ситуации в дни аномально-низких температур.

Для анализа синоптической ситуации, сопутствующей дням со среднесуточной температурой воздуха «значительно ниже среднего» использованы данные архива приземных и высотных барических карт за период с 1917 по 2016 гг. кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета. Также к исследованию были привлечены карты реанализа за период с 1917 по 2016 гг., построенные с помощью глобальной гидродинамической модели атмосферы *GFS* (*Global Forecast System* (Глобальная Система Прогнозирования)) [5].

Выявленные в ходе исследования характерные синоптические ситуации для дней с аномально низкими температурами подразделяются на следующие три основные групп.

1. Над Санкт-Петербургом располагается тыл обширного циклона, движения холодных воздушных масс в сторону Санкт-Петербурга наблюдаются с арктического побережья и района Новой Земли.

2. Санкт-Петербург находится под влиянием гребня высокого давления, ось вторжения которого может быть направлена как со стороны Сибири и Новой земли (отрог Сибирского антициклона), так и с района Шпицбергена (арктическое вторжение).

3. Над Санкт-Петербургом наблюдалось малоградиентное поле. В большинстве случаев это была седловина.

Процентное соотношение синоптических ситуаций, отнесенных к одной из выявленных групп, наблюдаемых в дни с аномально низкими зимними температурами, представлено на рис. 2.

Рис. 2. Повторяемость характерных синоптических ситуаций для дней с аномально низкими зимними температурами за период с 1917 по 2016 гг.

Таким образом, можно заключить, что антициклоны в исследуемом периоде чаще всего приводили к низким зимним температурам в районе Санкт-Петербурга.

Однако начиная с 1987 г. в Санкт-Петербурге волн холода не наблюдалось вообще, а единичные случаи аномально низких температур были зафиксированы в

2002 и в 2006 гг. Следует отметить, что границы градаций рассчитывались на основе ряда данных наблюдений за сто лет.

С начала 2000-х годов термический режим зимнего климатического сезона является аномальным. В 2014 и 2015 гг. дата устойчивого перехода температуры воздуха через нулевой предел в сторону повышение (окончание зимнего сезона) пришлась на 8 и 17 февраля соответственно. Возросла повторяемость начала климатической зимы в декабре и даже январе. Низкие температуры воздуха, соответствующие уровню, наблюдаемому до 1990 гг., практически не наблюдается.

Для выявления причин таких изменений было принято решение о выделении и анализе синоптических ситуаций, соответствующих минимальным за зимний сезон температурам периода с 2000 по 2016 гг.

В рассмотренном периоде обнаружено всего два события (дня с минимальной за зимний сезон температурой воздуха), попадающих в градацию «значительно ниже среднего» (ниже -24,4 °С), вычисленную для периода в сто лет.

Рассмотрим синоптические ситуации, сопутствующие дням с минимальными для каждого зимнего сезона температурами воздуха.

Чаще всего минимальной зимней температуре соответствует вторжение гребня Сибирского или Азиатского антициклонов. Гребень Сибирского антициклона традиционно вызывает значительное понижение температуры в Санкт-Петербурге. Однако в настоящее время ось гребня этого антициклона проходит через Ботнический залив в сторону Швеции, потоки холодного воздуха двигаются не с Арктического побережья, а с центра России, что соответствует более высоким температурам воздуха.

Реже над Санкт-Петербургом наблюдается седловина по типу антициклона, гребень Сибирского антициклона проходит севернее Санкт-Петербурга, поэтому не наблюдается таких низких, как в прошлом веке, значений среднесуточной температуры воздуха. В процессе анализа синоптических ситуаций сделан вывод об изменении оси вторжения Сибирского антициклона в район Северо-Запада России.

На следующем этапе исследования был создан архив вторжений отрогов Сибирского антициклона с 2000 по 2016 гг. за каждый зимний период, безотносительно к минимальным температурам воздуха. Всего за указанный интервал времени выявлено 55 вторжений гребня Сибирского антициклона в зимний период. Рассмотрим характерные синоптические ситуации.

В результате анализа синоптической ситуации, представленной на рис. 3 (белые изолинии на рисунке – изобары) и характерной для большинства случаев вторжений, произошедших в рассматриваемом периоде, можно заключить, что в большинстве таких случаев ось вторжения Сибирского антициклона находится севернее Санкт-Петербурга. Гребень антициклона располагается над акваториями Карского, Баренцева и восточной частью Норвежского морей. Очаги аномального холода в эти дни фиксируются над западной частью Северного Ледовитого океана. Над областью исследования наблюдается высокоградиентное барическое поле, воздушные массы поступают с северо-востока ЕТР, южнее Санкт-Петербурга располагается циклон.

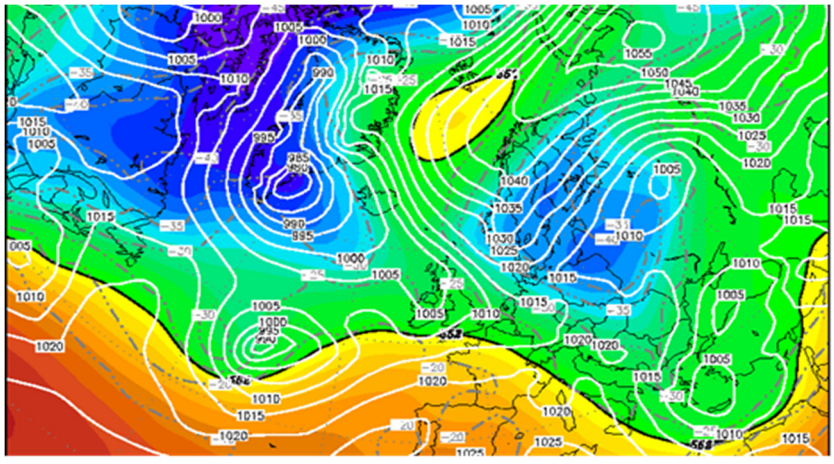


Рис. 3. Распространение Сибирского антициклона в период с 2000 по 2016 гг.

Такая ситуация наблюдается достаточно часто, и это позволяет сделать вывод о том, что именно облачные массы циклонов, проходящих южнее Санкт-Петербурга, влияют на «смягчение» зимних температур.

Следующая, ситуация, характерная для вторжения гребня Сибирского антициклона в последние годы представлена на рис. 4.

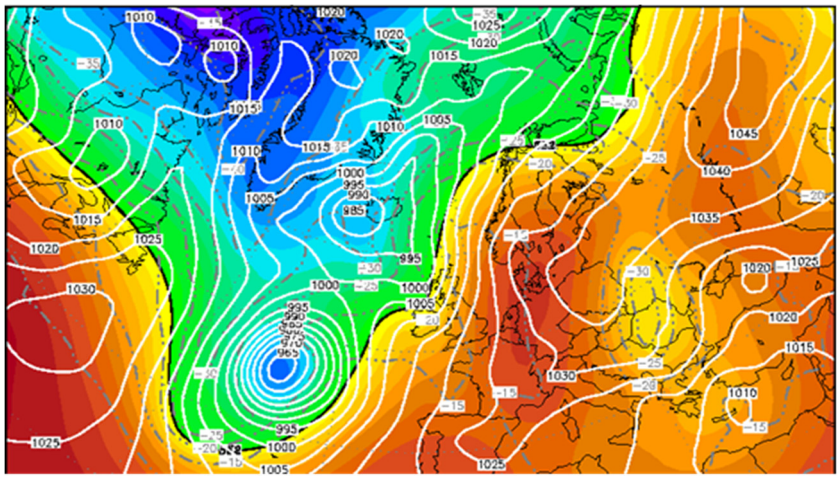


Рис. 4. Распространение Сибирского антициклона в период с 2000 по 2016 гг.

Гребень Сибирского антициклона распространяется на Центральную и Европейскую часть России. Санкт-Петербург находится в районе северной периферии гребня, затоки воздушных масс наблюдаются с юго-запада и приносят тепло.

Для детального понимания различий в характеристиках вторжений, происходящих в настоящее время, от аналогичных событий, протекавших в период до 2000 гг., мы приводим синоптическую ситуацию 1982 г., сформировавшуюся при распространении Сибирского антициклона (рис. 5). Как раз в этот период в Санкт-Петербурге наблюдалась аномально низкая температура воздуха.

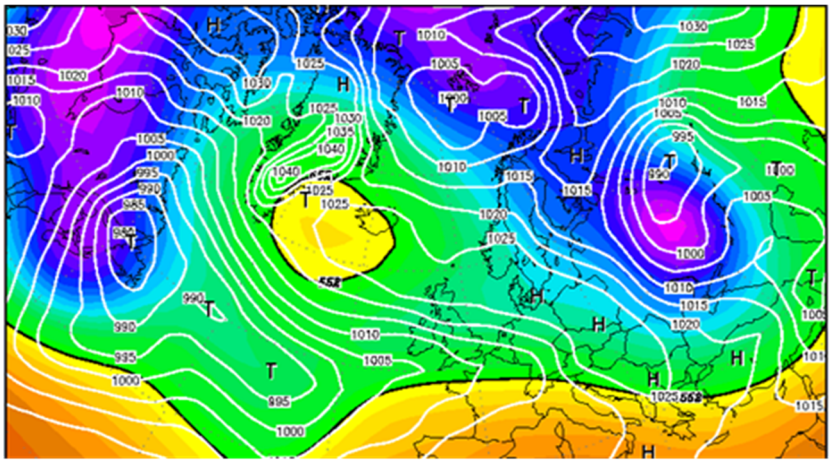


Рис. 5. Вторжение Сибирского антициклона 9 января 1982 г.

В данном примере ось гребня ориентирована меридионально и расположена так, что Санкт–Петербург находится в малоградиентной зоне высокого давления.

В последние годы в области исследования при вторжениях гребня Сибирского антициклона наблюдается существенное усиление градиента давления, сам гребень располагается над Арктическим побережьем и западной частью Северного Ледовитого океана, не захватывая центр Северо-Западного региона и Санкт-Петербург. Санкт-Петербург находится в высокоградиентной зоне между гребнем и циклоном, расположенным над Центральной Россией.

Выводы

В ходе исследования было выявлено, что при распространении Сибирского антициклона после 2000 г. ось его гребня приобрела более широтную ориентацию и проходит севернее Санкт–Петербурга – над акваториями Карского, Баренцева и восточной частью Норвежского морей. Очаги аномального холода в эти дни фиксируются над западной частью Северного Ледовитого океана. В некоторых случаях вторжение гребня Сибирского антициклона проходит южнее Санкт–Петербурга. Над городом располагается северная периферия гребня, что приводит к перемещению воздушных масс к пункту исследования с запада, юго-запада.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайруллина Г. Р. Элементы общей циркуляции и распределение влагозапаса атмосферы Земли / под ред. Е. А. Лупян. – М.: ИКИ РАН, 2008. – 60 с.
2. Угрюмов А. И. Долгосрочные метеорологические прогнозы. – СПб.: Изд-во. РГГМУ, 2006. – 84 с.
3. Ефимова Ю. В., Кондратович К. В. Условия возникновения сильных и катастрофических наводнений в зимний период // Материалы итоговой сессии ученого совета РГГМУ. – 2003. – 29 с.
4. Ефимова Ю. В. Условия возникновения сильных невских наводнений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Российский государственный гидрометеорологический университет. Санкт-Петербург. 2003. – 136 с.
5. Архив данных наблюдений за погодой и карт погоды «Wetterzentrale». https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis

6. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных. Специализированные массивы данных для климатических исследований. http://meteo.ru/it/178-aisori.
7. Вангенгейм Г. Я. Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики // Труды ААНИИ. – 1952. – Т. 34. – 314 с.
8. Гирс А. А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. – Л: Гидрометеоиздат, 1974. – 488 с.

THE CIRCULATING CHANGES THAT AFFECTED THE FORMATION OF THE COLD WAVE IN THE CITY.ST. PETERSBURG DURING THE WINTER PERIOD

Y. V. Efimova[1], Y. B. Babich[1], L. O. Neelova[1], N. S. Eremina[1], A. I. N. Mkanna[1], I. V. Lavrova[1,3] ([1]RSHU, [2]Autonomous nonprofit organization of continuing professional education ETM Academy, [3]«GNINGI» JSC)

The decrease in the duration of the winter climate season observed in recent years in the St. Petersburg region, as well as a significant decrease in the frequency of abnormally low temperatures, necessitated the implementation of the presented scientific research. The research paper presents the results of a study of the conditions for the formation of abnormally low average daily air temperatures in the winter season in St. Petersburg over a long period. The synoptic situations accompanying significant cold snap in St. Petersburg in the winter season are estimated. Peculiarities of changes during the invasion of the crest of the Siberian anticyclone are revealed, which lead to a decrease in the frequency of days with abnormally low air temperatures in St. Petersburg. At present, the axis of the crest of the Siberian anticyclone passes over the waters of the seas of the Arctic Ocean. Centers of anomalous cold these days are recorded over the western part of the Arctic Ocean.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАБИЧ Ярослав Борисович,
к. ф-м. н., начальник информационного отдела АНО ДПО «Академия ЭТМ»
E-mail: jar.babich@gmail.com

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

ДЕРЯБИН Виктор Владимирович,
канд. техн. н., доцент, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова».
E-mail: gmavitder@mail.ru

ЕРЁМИНА Надежда Сергеевна,
старший преподаватель кафедры экспериментальной физики атмосферы РГГМУ.
E-mail: hope-err@mail.ru

ЕФИМОВА Юлия Викторовна,
канд. геогр. н., доцент кафедры Метеорологических прогнозов ФГБОУ ВО «РГГМУ».
E-mail: luluef@mail.ru

ЖИЛИН Денис Михайлович,
преподаватель ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова».
E-mail: denis@hydro-c.com

ЖУКОВ Юрий Николаевич,
докт. техн. н., ведущий научный сотрудник ФГБУ «ГОИН им. Н. Н. Зубова».
E-mail: zhukov50@mail.ru

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

КОЛОБОВ Евгений Владиславович, начальник лаборатории АО «ГНИНГИ».
E-mail: logistmira@yandex.ru

КОСТЕНИЧ Александр Валерьевич, ведущий научный сотрудник АО «ГНИНГИ», канд. техн. наук.
E-mail: alkostenich@mail.ru

Yaroslav B. BABICH,
CandSc, chief of information division of ANO CPE «ETM Academy».
E-mail: jar.babich@gmail.com

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

Victor V. DERYABIN,
CandSc, Associate Professor of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping.
E-mail: gmavitder@mail.ru

Nadezhda S. EREMINA,
Senior Lecturer, Department of Experimental Physics of the Atmosphere, RSHU.
E-mail: hope-err@mail.ru

Yulia V. EFIMOVA,
CandSc, Associate Professor of the Department of Meteorological forecasts, Russian State Hydrometeorological University.
E-mail: luluef@mail.ru

Denis M. ZHILIN,
Lecturer of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping.
E-mail: denis@hydro-c.com

Yuri N. ZHUKOV,
Dr. Sc., leading researcher, The State Oceanographic Institute (SOIN).
E-mail: zhukov50@mail.ru

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

Evgeny V. KOLOBOV,
The chief of laboratory, «GNINGI» JSC.
E-mail:logistmira@yandex.ru

Alexander V. KOSTENICH,
leading researcher, «GNINGI» JSC, CandSc.
E-mail:alkostenich@mail.ru

КРУПСКИЙ Кирилл Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент, начальник отдела Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.
E-mail: kirill11223@gmail.com

КУДИНОВ Михаил Георгиевич,
кандидат технических наук, начальник лаборатории ВКА имени А. Ф. Можайского.
E-mail: kudinov.m@gmail.com

ЛАВРОВА Ирина Викторовна,
канд. геогр. н., ведущий научный сотрудник НИОЦ АО «ГНИНГИ».
E-mail: livspb@yandex.ru

ЛОБАНОВ Андрей Александрович,
заместитель начальника научно-исследовательского отдела АО «ГНИНГИ», канд. техн. н.
E-mail: info@gningi.ru

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

МХАННА Ааед Исмаил Назир,
к. ф-м. н., доцент кафедры метеорологии, климатологии и охрана атмосферы «МКОА».
E-mail: aaedmohanna2001@mail.ru

НЕЕЛОВА Людмила Олеговна,
к. ф-м. н., доцент, доцент кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ.
E-mail: murs2000@mail.ru

ПУЧНИН Владимир Васильевич,
докт. воен. н., профессор, профессор ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова».
E-mail: vlad.puchnin@yandex.ru

СПЕСИВЦЕВ Александр Борисович,
младший научный сотрудник Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.
E-mail: asp.vka@yandex.ru

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

ЧЕРВЯКОВА Нина Владимировна,
кандидат технических наук, начальник отдела НИОЦ АО «ГНИНГИ»
E-mail: n.chervyakova@gningi.ru

ШАВИН Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории ВКА имени А. Ф. Можайского.
E-mail: shavin88@mail.ru

Kirill A. KRUPSKIY
CandSc, associate professor, head of department A. F. Mozhaisky Military Space Academy.
E-mail: kirill11223@gmail.com

Mikhail G. KUDINOV,
CandSc, associate professor, head of laboratory A. F. Mozhaisky Military Space Academy
E-mail: kudinov.m@gmail.com

Irina V. LAVROVA,
Cand. Sc., leading researcher of the Research Oceanographic Center, «GNINGI» JSC.
E-mail: livspb@yandex.ru

Andrei A. LOBANOV,
Deputy chief of research division, «GNINGI» JSC, CandSc.
E-mail: info@gningi.ru

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

Aaed I. N. MKHANNA
CandSc, associate professor, RSHU.
E-mail: aaedmohanna2001@mail.ru

Lyudmila O. NEELOVA,
CandSc, associate professor, Department of Meteorological Forecasts, RSHU.
E-mail: murs2000@mail.ru

Vladimir V. PUCHNIN,
professor of the chair, N. G. Kuznetsov Naval academy, DSc, professor.
E-mail: vlad.puchnin@yandex.ru

Alexander B. SPESIVTCEV,
junior researcher, A. F. Mozhaisky Military Space Academy.
E-mail: asp.vka@yandex.ru

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

Nina V. CHERVYAKOVA,
CandSc, Chief of division, Research Oceanographic Center, «GNINGI» JSC.
E-mail: n.chervyakova@gningi.ru

Alexander S. SHAVIN,
CandSc, associate professor, head of laboratory A. F. Mozhaisky Military Space Academy.
E-mail: shavin88@mail.ru

РЕФЕРАТЫ

УДК 351/354

Национальная морская политика Российской Федерации на Арктическом региональном направлении. Приоритетные направления развития навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в Арктической зоне. А. И. Исмаилов, А. А. Лобанов, В. В. Пучнин. – Навигация и гидрография. – 2020. – № 60. – С. 7–15.

В статье на основе анализа основных вызовов и угроз национальной безопасности Российской Федерации показаны приоритеты национальной морской политики на Арктическом региональном направлении, показано место навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения в реализации национальной морской политики в Арктическом бассейне, предложены основные направления развития навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в Арктической зоне.

Ключевые слова: национальная морская политика, вызовы и угрозы безопасности Российской Федерации, приоритетные направления, развитие навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в Арктической зоне.

УДК 629.783

Методика оценивания влияния структуры орбитальной группировки космических аппаратов на эффективность решения навигационной задачи псевдодальномерным методом. К. А. Крупский, М. Г. Кудинов, А. С. Шавин, А. Б. Спесивцев. – Навигация и гидрография. – 2020. – № 60. – С. 16–23.

Рассматривается оценка влияния структуры орбитальной группировки навигационных космических аппаратов и условий видимости их на точность и возможность решения навигационной задачи псевдодальномерным методом. Даны рекомендации по учету влияния структуры орбитальной группировки навигационных космических аппаратов на качество навигации.

Ключевые слова: навигационная задача, псевдодальномерный метод, навигационный космический аппарат, орбитальная группировка, ГЛОНАСС.

УДК 681.7

Способ измерения абсолютной угловой скорости линейными акселерометрами. П. И. Малеев. – Навигация и гидрография. – 2020. – № 60. – С. 24–31.

Известные способы измерения абсолютной угловой скорости с помощью только акселерометров предъявляют к последним чрезвычайно высокие требования, а поэтому до настоящего времени не реализуются. В статье рассмотрен предложенный нами способ измерения абсолютной угловой скорости на акселерометрах с требованиями на порядки меньшими к порогу их чувствительности.

Ключевые слова: гироскопы, акселерометры, датчики абсолютной угловой скорости, инерциальные навигационные системы.

УДК. 656.61.052:527.61:004.032.26

Модель движения судна на основе нейронных сетей. В. В. Дерябин. – Навигация и гидрография. – 2020. – № 60. – С. 32–42.

Предложена модель динамики судна в горизонтальной плоскости с тремя степенями свободы на основе нейронных сетей. В структуре модели несколько сетей. Выполнено обучение одной из сетей с использованием навигационного тренажёра. Результаты говорят в пользу работоспособности модели.

Ключевые слова: движение судна, счисление пути судна, нейронная сеть, машинное обучение.

УДК 658.5

Инерциальная навигационная система на одних лишь акселерометрах. П. И. Малеев. – Навигация и гидрография. – 2020. – № 60. – С. 43–45.

Схемы инерциальных навигационных систем (ИНС) на одних лишь акселерометрах (без гироскопов) известны давно. Однако реализовать их из-за чрезвычайно высоких требований к акселерометрам не представляется возможным. Предложенный нами датчик абсолютной угловой скорости на акселерометрах позволяет решить эту проблему. Рассмотренная ниже схема такой ИНС использует акселерометры с уже достигнутым порогом чувствительности, что обеспечивает высокую степень унификации ее основных элементов, их меньшие по сравнению с гироскопами массо-габаритные характеристики и стоимость, а также большую простоту в изготовлении.

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, акселерометры, датчики абсолютной угловой скорости, порог чувствительности.

УДК 528.92

Метод построения координатной системы для навигации по полю рельефа дна. В. Ю. Бахмутов, Ю. Н. Жуков. – Навигация и гидрография. – 2020. – № 60. – С. 46–54.

В статье рассмотрен метод навигации по рельефу дна, отличный от известных. Метод состоит в построении координатной системы по рельефу дна в районе плавания аппарата с использованием интегрального преобразования Радона. Дополнительным преимуществом метода является возможность определения пространственной ориентации подводного аппарата относительно сторон света на основе обработки информации по рельефу.

Ключевые слова: рельеф дна, подводные автономные аппараты, навигация по рельефу, преобразование Радона, координатные системы.

УДК 551.462

Комплексные исследования в Северном Ледовитом океане в 2019 году. В. Ю. Бахмутов, Е. В. Колобов, А. В. Костенич, Н. В. Червякова, Д. М. Жилин – Навигация и гидрография. – 2020. – № 60. – С. 55–67.

Рассмотрены основные задачи и результаты комплексных исследований, выполненных под руководством и при участии специалистов Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института, в интересах обоснования Внешней границы континентального шельфа России в Арктике. Впервые в мировой практике в тяжелых ледовых условиях применен специфический комплекс исследований, включающий, кроме съёмки рельефа дна и гравиметрии, сейсмоакустический глубинный метод изучения подстилающих приповерхностных осадков.

Ключевые слова: Арктика, шельф, континентальный склон, батиметрическая съемка, сейсмоакустика, гравиметрия.

УДК 528.92

Особенности приливных колебаний на открытых акваториях. Ю. Н. Жуков, Е. В. Федорова. – Навигация и гидрография. – 2020. – № 60. – С. 68–80.

В статье представлены основные терминологические понятия и свойства приливов. Описаны свойства пространственно-временной кинематики приливов на открытых акваториях. Обоснована необходимость разработки методов учета распределения приливных колебаний на открытых акваториях в гидрографии и технологической деятельности в прибрежной зоне морей.

Ключевые слова: приливы, приливные колебания, приливные карты, поле фаз, поле амплитуд, амфидромические точки.

УДК 551.589

Особенности изменения синоптических процессов, формирующих волны холода в г. Санкт-Петербурге в зимний период. Ю. В. Ефимова, Я. Б. Бабич, Л. О. Неелова, Н. С. Еремина, А. И. Н. Мханна, И. В. Лаврова. – Навигация и гидрография. – 2020. – № 60. – С. 80–88.

В научно-исследовательской работе представлены результаты анализа условий формирования аномально низких среднесуточных температур воздуха в зимний сезон в Санкт-Петербурге за длительный период. Выполнена оценка синоптических ситуаций, сопутствующих значительным похолоданиям в Санкт-Петербурге в зимний сезон. Выявлены особенности изменения вторжения гребня Сибирского антициклона, приводящие к уменьшению повторяемости дней с аномально низкими температурами воздуха в Санкт-Петербурге. В настоящее время ось гребня Сибирского антициклона проходит над акваторией морей Северного Ледовитого океана. Очаги аномального холода в эти дни фиксируются над западной частью Северного Ледовитого океана.

Ключевые слова: изменения климата, волны холода, аномально низкие температуры воздуха, синоптические процессы, гребень Сибирского антициклона.

ABSTRACTS

The National Maritime Policy of the Russian Federation on the Arctic Regional Direction. Priority Directions of the Development of Navigation-Hydrographic and Hydrometeorological Support for Maritime Activities in the Arctic Zone. A. I. Ismailov, A. A. Lobahov, V. V. Puchnin. – Navigation and Hydrography. – 2020. – No. 60. – P. 7–15.

The article on the basis of the analysis of the main challenges and threats to the national security of the Russian Federation shows the priorities of the national maritime policy on the Arctic regional direction, shows the place in the navigation-hydrographic and hydrometeorological support in the implementation of national maritime policy in the Arctic basin, suggested that the main directions of development of navigation-hydrographic and hydrometeorological support of maritime activities in the Arctic zone.

Key words: the national maritime policy, challenges and threats to the national security of the Russian Federation, priority directions, the development of navigation-hydrographic and hydrometeorological support of maritime activities in the Arctic zone.

Method of Assessing the Impact of the Structure of the Orbital Network of Spacecraft on the Efficiency of Solving the Navigation Application by Pseudo-rangefinder Measuring Method. K. A. Krupskiy, M. G. Kudinov, A. S. Shavin, A. B. Spesivtcev. – Navigation and Hydrography. – 2020. – No. 60. – P. 16–23.

The assessment of the impact of the structure of the orbital network of navigation spacecraft and their visibility conditions on accuracy and possibility of solving the navigation application by pseudo-rangefinder measuring method is considered. Recommendations are given on the impact of the influence of the orbital network of navigation spacecraft on the quality of navigation.

Key words: navigation application, pseudo-rangefinder measuring method, navigation spacecraft, orbital network, GLONASS.

A Method for Measuring Absolute Angular Velocity by the Linear Accelerometers. P. I. Maleev. – Navigation and Hydrography. – 2020. – No. 60. – P. 24–31.

The known methods for measuring the absolute angular velocity using only accelerometers impose extremely high requirements on the latter and therefore have not been implemented to date. The article considers the proposed method for measuring the absolute angular velocity on accelerometers with requirements that are orders of magnitude lower to the threshold of their sensitivity.

Key words: gyroscopes, accelerometers, absolute angular velocity sensors, inertial navigation systems.

A Model of Vessel Motion on the Basis of Neural Networks. V. V. Deryabin. – Navigation and Hydrography. – 2020. – No. 60. – P. 32–42.

A model of ship dynamics in the horizontal plane with three degree of freedom on the basis of neural networks is proposed. There are several networks in the structure of the model. Training of one of the networks has been performed with the use of a navigational simulator. The results are in favor of the working ability of the model.

Key words: ship motion, dead reckoning of vessel track, neural network, machine learning.

Inertial Navigation System Based on Accelerometers Alone. P. I. Maleev. – Navigation and Hydrography. – 2020. – No. 60. – P. 43–45.

Schemes of inertial navigation systems (INS) based only on accelerometers (without gyroscopes) have been known for a long time. However, it is not possible to implement them due to the extremely high requirements for accelerometers. The proposed sensor of absolute angular velocity on accelerometers allows us to solve this problem. The scheme of such an INS considered below uses accelerometers with an already achieved sensitivity

threshold, which provides a high degree of unification of its main elements, their lower mass-dimensional characteristics and cost compared to gyroscopes, as well as greater ease of manufacture.

Key words: inertial navigation systems, accelerometers, the sensors of absolute angular velocity, threshold of sensitivity.

Method for Constructing a Coordinate System for Navigating the Field the Seabed Topography. V. Yu. Bakhmutov, Yu. N. Zhukov. – Navigation and Hydrography. – 2020. – No. 60. – P. 46–54.

The article considered a method of navigation on the seabed topography which is different from the known ones. The method consists of constructing a coordinate system on the seabed topography in the navigation area of the underwater vehicle using the integral Radon transformation. An additional advantage of the method is the ability to determine the spatial orientation of the underwater vehicle relative to the cardinal directions based on the processing of information on the seabed topography.

Key words: the seabed topography, autonomous underwater vehicle, Radon transformation, coordinate systems.

Comprehensive Research in the Arctic Ocean in 2019. V. Yu. Bakhmutov, E. V. Kolobov, A. V. Kostenich, N. V. Chervyakova, D. M. Zhilin. – Navigation and Hydrography. – 2020. – No. 60. – P. 55–67.

The main tasks and results of comprehensive research carried out under the guidance and with the participation of specialists of the State Research Navigation-Hydrographic Institute in the interests of substantiating the Outer limit of the continental shelf of Russia in the Arctic are considered. For the first time in world practice, a specific set of studies has been applied in severe ice conditions, including, in addition to surveying the seabed topography and gravimetry, a seismoacoustic deep method for studying underlying near-surface sediments.

Key words: Arctic, shelf, continental slope, bathymetric survey, seismoacoustics, gravimetry.

The Features of Tidal Oscillations in Open Water Areas. Yu. N. Zhukov, E. V. Fedorova. – Navigation and Hydrography. – 2020. – No. 60. – P. 68–80.

The article presents the main terminological concepts and properties of tides. The properties of the spatiotemporal kinematics of tides in open water areas are described. The necessity of developing methods for accounting for the distribution of tidal oscillations in open water areas in hydrography and technological activity in the coastal zone of the seas has been substantiated.

Key words: tides, tidal oscillations, tidal charts, phase fields, amplitude fields, amphidromic points.

The Circulating Changes that Affected the Formation of the Cold Wave in the City.St. Petersburg During the Winter Period. Y. V. Efimova, Y. B. Babich, L. O. Neelova, N. S. Eremina, A. I. N. Mkanna, I. V. Lavrova. – Navigation and Hydrography. – 2020. – No. 60. – P. 80–88.

The decrease in the duration of the winter climate season observed in recent years in the St. Petersburg region, as well as a significant decrease in the frequency of abnormally low temperatures, necessitated the implementation of the presented scientific research. The research paper presents the results of a study of the conditions for the formation of abnormally low average daily air temperatures in the winter season in St. Petersburg over a long period. The synoptic situations accompanying significant cold snap in St. Petersburg in the winter season are estimated. Peculiarities of changes during the invasion of the crest of the Siberian anticyclone are revealed, which lead to a decrease in the frequency of days with abnormally low air temperatures in St. Petersburg. At present, the axis of the crest of the Siberian anticyclone passes over the waters of the seas of the Arctic Ocean. Centers of anomalous cold these days are recorded over the western part of the Arctic Ocean.

Key words: climatological changes, the cold wave, abnormally low air temperatures, the synoptic situations, the crest of the Siberian anticyclone.

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, 2020, № 60

Научный редактор П. И. Малеев

Редактор И. Ю. Бугрова

Технический редактор В. Ю. Бахмутов

Подписано в печать 24.07.2020 г.
Тираж 300 экз.
Заказ № 32/02 от 25.07.2020 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»