

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

ИЗДАЕТСЯ С 1995 ГОДА

**23
2006**

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербург

Главный редактор

д. т. н., проф. С. П. Алексеев

Редакционная коллегия:

д. т. н., проф. А. Н. Добротворский (первый заместитель главного редактора);
д. в. н., проф. П. Г. Бродский (заместитель главного редактора);
д. т. н. П. И. Малеев (научный редактор); к. г.-м. н. И. Ю. Бугрова (редактор);
В. Ю. Бахмутов (ответственный за выпуск); д. т. н., проф. Б. Н. Беляев;
к. т. н. М. Л. Богданович; к. в.-м. н., проф. А. А. Дадашев;
д. т. н., проф. Б. Е. Иванов; д. в. н., проф. А. И. Исмаилов;
к. т. н. И. В. Капустин; д. в. н. В. А. Катенин;
к. т. н. Н. И. Леденев; д. т. н., проф. Б. И. Лобойко; к. т. н. С. И. Мастрюков;
д. в.-м. н., проф. А. П. Михайловский; д. т. н., проф. Н. Н. Неронов;
д. т. н. А. Б. Опарин; д. т. н., проф. В. И. Пересыпкин;
акад. РАН В. Г. Пешехонов; к. в. н. Ю. В. Румянцев;
чл.-кор. РАН А. Е. Сазонов; чл.-кор. РАН А. И. Сорокин; к. т. н. С. В. Яценко

**© Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт
Министерства обороны Российской Федерации**

2006

**THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC
INSTITUTE**

NAVIGATION AND HYDROGRAPHY

PUBLISHED SINCE 1995

**23
2006**

RUSSIAN FEDERATION MINISTRY OF DEFENCE

Saint-Petersburg

Editor-in-chief
S. P. Alekseyev, DSc, professor

Editorial board

A. Dobrotvorsky (first vice-editor-in-chief), DSc, professor;
P. Brodsky (vice-editor-in-chief), DSc, professor;
P. Maleyev, DSc (science editor); I. Bugrova (editor), CandSc;
V. Bakhmutov (the issue manager); B. Belyaev, DSc, professor;
M. Bogdanovich, CandSc; A. Dadashev, CandSc, professor;
B. Ivanov, DSc, professor; A. Ismailov, DSc, professor; I. Kapustin, CandSc;
V. Katenin, DSc; N. Ledenev, CandSc; B. Loboiko, DSc, professor;
S. Mastryukov, CandSc; A. Mikhaylovsky, DSc, professor;
N. Neronov, DSc, professor; A. Oparin, DSc; V. Peresypkin, DSc, professor;
V. Peshekhonov, DSc, Acad. RAS; Yu. Rumyantsev, CandSc;
A. Sazonov, CM RAS; A. Sorokin, DSc, CM RAS; S. Yatsenko, CandSc

© The State Research Navigation-Hydrographic Institute
Russian Federation Ministry of Defence

2006

СОДЕРЖАНИЕ

С. П. Алексеев. Российско-американские исследования в Беринговом и Чукотском морях – одно из приоритетных направлений деятельности ГНИНГИ МО РФ в 2006 г.	9
---	---

НАВИГАЦИЯ

В. А. Михальский, М. В. Тюлькин. Оценка навигационной безопасности подводного плавания вблизи точечных опасностей	17
В. А. Михальский, М. В. Тюлькин, А. Ю. Чумаков. Оценка навигационной безопасности подводного плавания вблизи множественных и протяженных опасностей	26
Б. Е. Иванов. Об оценке степени навигационной безопасности плавания при использовании распределения экстремальных погрешностей	37
Б. Е. Иванов. Оценка точности определения места по створам	43

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

С. П. Баринов, А. С. Баринов. Возможности использования морской дифференциальной подсистемы для определения текущего значения уровня моря	52
В. Н. Быстров, Б. И. Лобойко, Г. И. Ильющенко. Определение текущих координат и параметров движения волномерного буя по спутниковым навигационным системам	59
Н. Е. Иванов, Ю. П. Клеванцов, В. А. Рожков. Квантильный анализ связности колебаний уровня в Финском заливе	70
П. И. Малеев, И. В. Капустин, Б. М. Смирнов. К вопросу повышения точности определения параметров Пуассона, характеризующих намагниченность подвижного объекта.....	85
П. И. Малеев, А. А. Хребтов, В. И. Шерemet. Состояние развития и перспективы использования морской бортовой магнитометрической системы.....	91
Ю. Г. Фирсов. К вопросу о нормативных документах для выполнения гидрографических работ	97
В. Н. Горшков. О достоверности результатов гидрографического траления механическими тралами	108
С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков. Оценка плотности распределения вероятности локальных поднятий дна в междугалсовом пространстве	111

С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков, В. Ю. Бахмутов. Метод численной оценки параметров локальных поднятий поверхности морского дна при выполнении морского промера	116
Э. С. Зубченко. Современное состояние средств и методов оптического дистанционного зондирования для картографирования морских акваторий	120
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ОКЕАНОГРАФИЯ	134
Б. Н. Беляев. О пределе предсказуемости гидрометеорологических процессов и явлений	134
А. Б. Опарин, А. Ю. Устименко. Перспективы развития банка океанографических данных ВМФ	137
ИНФОРМАЦИЯ	149
ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	150

C O N T E N T S

S. P. Alekseyev. The RUSSIAN-American Explorations in the Bering and Chukchi Seas – One of the Priority Trends in GNINGI, RF MoD, Activities in 2006.....	9
NAVIGATION	
V. A. Mikhalsky, M. V. Tyulkin. Evaluation of Navigation Safety for Submarine Navigation near the Point Dangers.....	17
V. A. Mikhalsky, A. Y. Chumakov, M. V. Tyulkin. Evaluation of Navigation Safety for Submarine Navigation near the Multiple and Extensive Dangers.....	26
B. E. Ivanov. On the Estimate of the Navigation Safety Degree when Using the Extreme Errors Distribution	37
B. E. Ivanov. Evaluation of the Accuracy of Fixing the Position by Navigational Ranges.....	43
HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY	
S. P. Barinov, A. S. Barinov. Possibilities of Employment of Marine GNSS Equipment to Determine the Running Value of the Water Level	52
V. N. Bystrov, B. I. Loboiko, G. I. Ilyushchenko. Determination of the Running Co-ordinates and Motion Parameters for the Wave-measuring Buoy by Satellite Navigation Systems by Satellite Navigation Systems	59
N. E. Ivanov, Y. P. Klevantsov, V. A. Rozhkov. The Quantile Analysis of Interrelation of the Sea Level Fluctuations in the Gulf of Finland	70
P. I. Maleyev, I. V. Kapustin, B. M. Smirnov. On the Problem of Improving the Accuracy of Determining the Poisson Parameters that Characterize the Magnetization of a Movable Object.....	85
P. I. Maleyev, A. A. Khrebtov, V. I. Sheremet. The State of Development and Prospects for Employment of the Marine Shipborne Magnetometric System	91
Y. G. Firsov. On the Normative Documents for Hydrographic Survey.....	97
V. N. Gorshkov. On Validity of Hydrographic Sweeping by Stiff Sweeps.....	108
S. V. Reshetnyak, A. L. Tesikov. Estimate of Density of Distribution for Local Bottom Rises Probabilities in the Survey Line Spacing.....	111
S. V. Reshetnyak, A. L. Tesikov, V. Y. Bakhmutov. Method of Numerical Evaluation of Parameters for the Local Sea Bottom Rises When Conducting the Sea Survey	116

E. S. Zubchenko. The Present Day State of Optical Remote Sensing Means and Methods for Charting the Sea Water Areas	120
HYDROMETEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY	
B. N. Belyaev. On Predictability Limit for Hydrometeorological Processes and Phenomena	134
A. B. Oparin, A. Y. Ustimenko. Prospects for Development of the Navy Oceanographic Data Bank	137
INFORMATION	149
INFORMATION ABOUT AUTHORS	150

ГРНТИ 78.21.41

**РОССИЙСКО-АМЕРИКАНСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В
БЕРИНГОВОМ И ЧУКОТСКОМ МОРЯХ – ОДНО ИЗ ПРИОРИТЕТНЫХ
НАПРАВЛЕНИЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГНИНГИ МО РФ В 2006 Г.**

С. П. АЛЕКСЕЕВ
(ГНИНГИ МО РФ)

На основе анализа современных данных о климатических изменениях в северных полярных районах показаны роль и место проекта «РУСАЛКА» в изучении Арктического бассейна Северного Ледовитого океана, обоснована необходимость организации мониторинга его состояния. Рассмотрены результаты экспедиции сотрудников ГНИНГИ Минобороны России в Беринговом и Чукотском морях в 2006 г. «Русалка-2006» в рамках Совместной российско-американской долговременной программы по исследованию Арктики.

Как отмечено в материалах заседания Научно-экспертного совета Морской коллегии при Правительстве Российской Федерации (протокол от 27.11.2006 г. №6), приоритетность научных исследований Мирового океана обусловлена необходимостью обеспечения защиты национальных интересов Российской Федерации достижениями отечественной морской науки, фундаментальными и прикладными исследованиями и разработками, связанными с морской деятельностью в Мировом океане [1–4]. В то же время развитие новых знаний до уровня создания научно обоснованных систем планирования и обеспечения морской деятельности с целью повышения ее эффективности и безопасности существенно сдерживается полной или частичной неразрешенностью ряда проблем, в числе которых можно выделить:

- недостаточность данных об определяющих климатообразующих процессах в ключевых районах океана;
- невозможность сопоставления количественных характеристик климатической изменчивости океана и ее влияния на климат по различным типам данных и по результатам моделирования из-за отсутствия стандартов сравнения параметров, полученных различными наблюдательными системами и др.

В результате из-за ограниченности знаний о Мировом океане проявляется дисбаланс между растущей интенсивностью экономической, военной и политической нагрузки на Океан с одной стороны и недостатком научной обоснованности систем и механизмов планирования и принятия решений – с другой.

Важное значение в данном контексте имеют российско-американские исследования в Беринговом и Чукотском морях, осуществляемые экспедицией «RUSALCA-2006» в рамках реализации Совместной российско-американской долговременной программы по исследованию Арктики (Joint **Russian-**

American Long-term Census of the Arctic (RUSALCA) при участии специалистов ГНИНГИ МО РФ (со стороны ГНИНГИ МО РФ экспедицию возглавил В. М. Смолин).

Арктика является частью глобальной климатической системы, где вследствие межширотного адвективного обмена, внутреннего взаимодействия между компонентами арктической климатической системы (АКС) и глобальных изменений развиваются наиболее сильные естественные флуктуации характеристик климата. Этот факт обуславливает значительную активность в данном направлении арктических исследований.

В последнее десятилетие в Арктике был проведен ряд международных натуральных экспериментов по исследованию процессов, протекающих в Северном Ледовитом океане (СЛО). По их результатам международное научное сообщество пришло к выводу о том, что необходимо организовать мониторинг его состояния. Это связано прежде всего с тем, что в последние десятилетия в Арктике отмечалось значительное увеличение частоты прохождения и интенсивности циклонов, что привело к повышению температуры воздуха и появлению тенденции к сокращению площади и толщины арктических льдов, а также существенным изменениям в состоянии вод СЛО. Отмечено, что с 1987–1989 гг. в СЛО началось повышение температуры атлантических вод, которое для отдельных районов превысило максимальные значения за весь обозримый период наблюдений.

Следует отметить, что в течение длительного исторического периода Россия и другие страны осуществляли постоянное слежение за состоянием СЛО. Так, Россией с 1948 по 1993 гг. в арктических окраинных морях и Центральном арктическом бассейне в зимний период ежегодно выполнялись океанографические съемки с помощью самолетных экспедиций, а в течение года производились также непрерывные океанографические наблюдения на дрейфующих станциях «Северный Полус». Результаты этих наблюдений обеспечили России приоритет в исследованиях СЛО, что нашло отражение в изданных в стране «Атласе Северного Ледовитого океана» (1980) и «Атласе Арктики» (1985), имеющих общепризнанное научное и практическое значение. В дальнейшем на основе доступных российских и зарубежных океанографических данных были рассчитаны поля объективного анализа, составившие основу российско-американского электронного (на компакт-диске) климатического «Океанографического Атласа Северного Ледовитого океана» (1997, 1998).

Европейские страны подготовили и начали осуществлять программу непрерывного слежения за переносом льдов и вод через пролив Фрама путем постановки океанографических притопленных буйковых систем (ПБС) на годовой и более сроки наблюдений и проведения океанографических экспедиций в прилегающие районы океана.

США совместно с Канадой подготовили и в 2001 г. приступили к осуществлению программы развертывания долговременной

океанографической системы наблюдений в Амеразийском (Канадском) суббассейне (CABOS) путем установки океанографических ПБС на годовой и более срок наблюдений в различных его частях (см. рисунок). Основная цель программы состоит в изучении распространения тихоокеанских вод в суббассейне и получении инструментальных наблюдений за климатической изменчивостью его состояния. При этом впервые в СЛО океанографические ПБС были оснащены профилографом, который осуществлял наблюдения за течением, температурой и соленостью воды, периодически поднимаясь и опускаясь по тросу от поверхности до дна.

В конце 2000 г. Международным арктическим центром при университете штата Аляска (IARC, USA) в рамках обсуждения содержания научных проектов для российско-американского соглашения о сотрудничестве в исследованиях Мирового океана и полярных областей было высказано предложение о совместных исследованиях, направленных на изучение влияния и вклада вод атлантического происхождения в Северном Ледовитом океане (бассейны Амундсена и Нансена) в формирование изменчивости климата Арктики. В США эта программа получила название NABOS (Nansen-Amundsen Basins Observation System) – Система наблюдений в бассейнах Нансена и Амундсена (Евразийский суббассейн СЛО). При этом реализация данного совместного исследования планируется в форме нескольких проектов, предусматривающих как теоретические, так и натурные исследования, в том числе – инструментальные наблюдения за океанографическими параметрами с помощью притопленных буйковых станций (ПБС), расположенных в Арктическом бассейне вблизи склона шельфа (см. рисунок).

Таким образом, зарубежные страны, выдвинув и начав осуществление проектов SEARCH, CABOS, NABOS, организуют глобальное слежение за изменчивостью состояния СЛО. Россия в настоящее время также выполняет крупномасштабные исследования в Арктике и входит в международную кооперацию, с тем чтобы получить доступ ко всей океанографической информации, получаемой в рамках двусторонних и международных программ.

В 2003 г. американская сторона (НОАА) выступила с обращением о проведении совместной российско-американской экспедиции в Беринговом и Чукотском морях. Экспедиция должна была включать взятие проб, морские гидрофизические, геофизические, и биологические исследования в Беринговом и Чукотском морях.

В июле – сентябре 2004 и 2005 гг. были организованы и проведены российско-американская экспедиции в Беринговом и Чукотском морях по программе РУСАЛКА. Долгосрочной целью программы явилось выполнение продолжительного и детального мониторинга Берингова и Чукотского морей и Берингова пролива, соединяющего Тихий и Северный Ледовитый океаны.

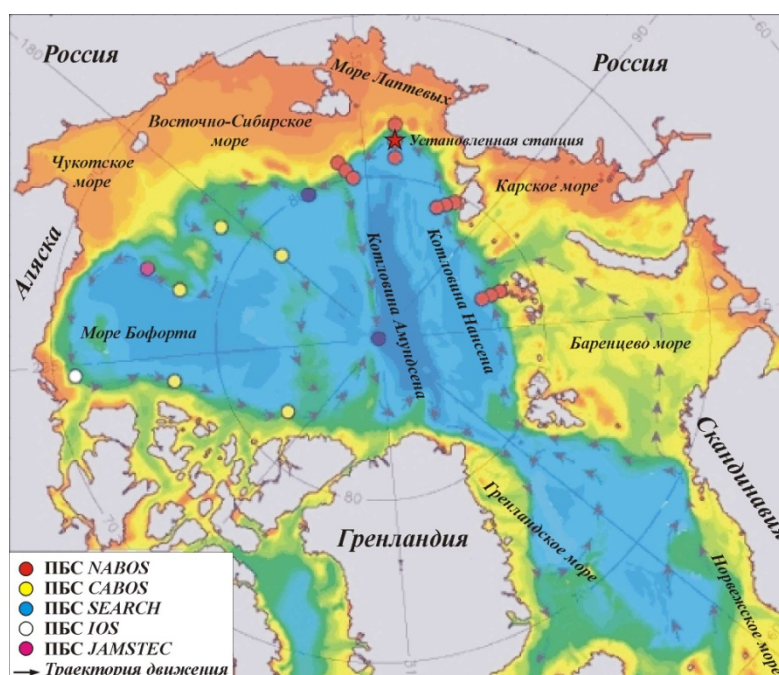


Схема расположения ПБС, осуществляющих мониторинг состояния СЛО, и предполагаемая схема наблюдений по проекту NABOS

- NABOS - Nansen-Amundsen Basins Observation System
(Наблюдательная система в бассейнах Нансена и Амундсена);
- CABOS - Canadian Arctic Basin Observation System
(Наблюдательная система в канадском секторе Арктики);
- SEARCH - Study of Environmental Arctic Change
(Программа по исследованию природных изменений в Арктическом бассейне);
- IOS - Institute of Ocean Sciences
(Институт морских наук);
- JAMSTEC - Japan Marine Science and Technology Center
(Центр морских наук и технологий, Япония)

Экспедиционные исследования в 2004 г. были выполнены на НИС «Профессор Хромов» ДВНИИГМИ, в 2005 г. – на гидрографическом судне «Север» ГС ТОФ при финансовой поддержке Отдела Арктических исследований NOAA. Исследования были направлены на получение комплексной информации о состоянии природной системы Берингова и Чукотского морей, взаимодействии ее основных компонент и их влиянии на формирование климатических сигналов в северных полярных районах. Выполнение программы работ предоставило доступ к информации, полученной зарубежными и отечественными учеными в результате кооперации. Сбор гидрологических, биохимических и гидробиологических данных из американских и российских баз данных явился основой для совместной оценки изменения климата, водообмена и состава биоценозов в Арктике.

Основные результаты экспедиций:

1. В ходе выполнения экспедиций были успешно осуществлены ежегодные постановки буйковых станций с российской и американской аппаратурой в западной части Берингова моря. Станции устанавливались сроком на один год. Постановка буйковых станций и последующая обработка данных дала уникальный материал для оценки пространственных и временных гидрологических характеристик и описания процессов во временных масштабах от часа до года. Полученные данные послужат материалом для разработки климатической модели, описывающей взаимодействие между Тихим и Северным Ледовитым океанами.
2. В результате проведения комплекса геолого-геофизических исследований на подводном вулкане Пийпа были получены данные, подтверждающие наличие современных подводных газовых и гидротермальных выходов на вершинах вулкана, а также обнаружены структуры вулканического происхождения на склонах вулкана. Измерена повышенная концентрация растворенной ртути в воде и воздухе в районе вулкана. Дальнейший анализ и обработка большого количества материалов гидроакустических исследований дает основание оценить уровень современной гидротермальной активности вулкана и влияние современных геологических процессов на природную среду.
3. В Чукотском море найдены высокие биомассы донных беспозвоночных, по-видимому, превосходящие известные данные по сообществам мягких грунтов других районов арктического региона. Существование богатых донных сообществ в юго-западной части Чукотского моря, по-видимому, возможно благодаря вихревым циркуляциям, зарождающимся в Чукотском море к западу от Берингова пролива. Эти циркуляции концентрируют биогенные вещества, фито- и зоопланктон, а донные сообщества, потребляя богатый планктон и сестон, аккумулируют в своей биомассе органику.

В Арктическом бассейне СЛО выделяются две особо значимые зоны – Берингов пролив и пролив Фрама. Колебание уровня моря в этих районах, особенности циркуляции через проливы в сезонном цикле, структура и характеристики вод во многом являются определяющими для понимания особенностей структуры вод и их циркуляции в Арктическом бассейне и в конечном итоге влияют на климатическую систему Северной полярной области в целом.

По сравнению с проливом Фрама Берингов пролив и акватории, к нему примыкающие, гораздо более доступны для проведения исследований экспериментального характера. Существуют периоды, когда этот район свободен ото льда, и можно выполнить детальную океанографическую съемку, а также поставить автономные буйковые станции как в самом проливе, так и на примыкающих морских акваториях. При этом система

водообмена через Берингов пролив и, соответственно, влияние Тихого океана на СЛО и наоборот изучена недостаточно полно, несмотря на большой объем проведенных исследований в этом районе.

Экспедиционные исследования в рамках проекта РУСАЛКА впоследствии могут явиться объединяющим началом для создания полномасштабного проекта, направленного на изучение процессов водообмена Берингова и Чукотского морей, а также влияния арктических вод на структуру океанологических полей Берингова моря и тихоокеанских – на структуру вод морей Чукотского и Бофорта. При этом, наряду с исследованием гидрофизических и гидрохимических характеристик, программа должна в полной мере учитывать информацию по седиментологии и морской биоте. Это особенно важно, поскольку в последнее десятилетие в ряде районов моря Лаптевых и приполярном районе Арктического бассейна обнаружены отдельные виды морских организмов, которые ранее здесь не наблюдались, но определенно имеют тихоокеанское происхождение. Перенос морскими льдами и водами осадочного материала, выносимого речными водами, во многом определяют состав осадков в районах, прилегающих к Берингову проливу. Последнее открывает возможность для оценки и реконструкции процессов палеоциркуляции вод в этих районах и Арктическом бассейне в целом.

Отдельным вопросом стоит исследование экосистемы региона, поскольку предполагаемые для исследования районы очень богаты растворенным кремнием, что всегда определяло здесь высокую биологическую активность, а планируемые разработки на шельфе Чукотского и Берингова морей могут внести существенный дисбаланс в экосистему районов, которые являются колыбелью для многих видов живых организмов.

Основными целями экспедиции 2006 г. явились следующие морские гидрофизические и биологические исследования в Беринговом проливе и Чукотском море:

- определение термохалинной структуры и динамики водных масс Чукотского моря и Берингова пролива;
- исследования колебаний уровня вод в регионе;
- исследования термодинамических процессов во фронтальных зонах для определения вертикальных и горизонтальных масштабов тепло-солеобмена;
- оценка тепломассообменных процессов между водными массами различного образования;
- исследования процессов трансформации водных масс в районе Чукотского моря и Берингова пролива;
- определение влияния ветро-волнового перемешивания на структуру вод;
- мониторинг сезонных изменений водных масс с целью изучения изменчивости вод и тестирования океанографических моделей;

- изучение субаквальной мерзлоты и определения наличия газогидратов в осадочном слое;
- измерение содержания ртути в воздухе;
- оценка границ района с высоким содержанием биомассы донных беспозвоночных в юго-западной части Чукотского моря.

Исходя из поставленных целей в экспедиции 2006 г. по проекту РУСАЛКА решались следующие задачи:

- выполнение океанографической съемки последовательно в запланированных районах №1, №2 и №3 в южной части Чукотского моря и в Беринговом проливе;
- выполнение акустического зондирования водной толщи по всему маршруту с компьютерной регистрацией отраженного сигнала и последующей специальной обработкой для изучения стратификации водной толщи, наличия биологических объектов, газовых факелов со дна;
- проведение акустического зондирования дна, измерения температуры проб грунта на стоянках и станциях в дрейфе для изучения субаквальной мерзлоты и наличия газогидратов в осадочном слое;
- выполнение непрерывно по всему маршруту измерений содержания ртути в воздухе;
- проведение отбора проб грунта для оценки границ района с высоким содержанием биомассы донных беспозвоночных в юго-западной части Чукотского моря.

Экспедиционные исследования 2006 г. были направлены на получение комплексной количественной информации о состоянии природной системы Чукотское море – Берингов пролив, о взаимодействии ее основных компонент и ее влиянии на формирование климатических изменений в северных полярных районах.

По окончании обработки материалов исследований (октябрь 2006 г.) отчет представлен в группу «Альянс» и в Федеральное агентство по науке и инновациям России. Владельцем материалов является НИЦ ГНИНГИ Минобороны России. Материалы исследований планируется передать иностранным участникам экспедиции после проведения экспертизы в соответствии с Российским законодательством. Полученные новые океанографические данные будут в значительной степени способствовать решению научных задач, поставленных перед российскими и зарубежными учеными.

Таким образом, проведенные в 2006 г. российско-американские исследования послужили дальнейшим вкладом в изучение Арктического бассейна СЛО. Они показали следующее:

1. Программа российско-американских исследований роли процессов трансформации тихоокеанских вод на материковом склоне Берингова и

Чукотского морей представляет значительный интерес для изучения современных климатических изменений в Арктике.

2. Использование современного оборудования и финансовых средств партнеров позволяет получить обширный материал для оценки изменчивости течений, температуры и солености поверхностных вод в Чукотском море и в Беринговом проливе, соединяющем Тихий и Северный Ледовитый океаны. Экспедиция дала представительную информацию о гидрофизических и биологических параметрах среды в Беринговом и Чукотском морях; об изменчивости теплозапаса тихоокеанских вод, его влиянии на ледяной покров и поверхностный слой океана; о параметризации потоков тепла, соли и импульса в различных слоях океана от поверхности до дна; а также для описания механизма образования промежуточных (холодного халоклина) и донных вод, тонкой и мезомасштабной структуры океана.

3. Полученные в экспедиции РУСАЛКА-2006 данные, кроме всего прочего, послужат тестовым материалом для разработки климатической модели взаимодействия между Тихим и Северным Ледовитым океанами. Модель позволит оценить влияние Тихого океана на климатические изменения Арктического региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2010 г.
2. Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 г. // Красная звезда. – 23.08.2001.
3. Алексеев С. П., Добротворский А. Н., Бродский П. Г. НГО и ГМО морской деятельности в контексте выработки стратегии изучения и освоения нефтегазового потенциала континентального шельфа России // Навигация и гидрография. – 2002. – № 14. – С. 9–13.
4. Алексеев С. П., Добротворский А. Н., Бродский П. Г. Военно-морской флот и освоение энергетических ресурсов Мирового океана: на пути реализации положений Морской доктрины России // Навигация и гидрография. – 2003. – № 17. – С. 9–14.

The Russian-American Explorations in the Bering and Chukchi Seas – One of the Priority Trends in GNINGI, RF MoD, Activities in 2006

S. P. ALEKSEYEV (GNINGI, RF MoD)

Based on the analysis of the present-day data about the climatic changes in the northern polar regions, the role and place of the «RUSALCA» project in exploring the Arctic Basin of the Arctic Ocean are shown. The necessity to organize the monitoring of the Arctic Ocean state is substantiated. Results of the expedition «RUSALCA-2006» carried out in 2006 by the GNINGI, RF MoD, researchers in the Bering and Chukchi Seas in the framework of the Joint Russian-American Long-Term Program for exploration of the Arctic are considered.

НАВИГАЦИЯ

ГРНТИ 78.21.41.

ОЦЕНКА НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДВОДНОГО ПЛАВАНИЯ ВБЛИЗИ ТОЧЕЧНЫХ ОПАСНОСТЕЙ

В. А. МИХАЛЬСКИЙ (ГНИНГИ МО РФ),
М. В. ТЮЛЬКИН (ВСОК ВМФ)

Обоснованы рекомендации по расчетам параметров навигационной безопасности плавания подводных лодок с инерциальными навигационными комплексами вблизи одиночных, а также в районе расположения группы точечных навигационных опасностей. Приведены таблицы для практических расчетов.

Под навигационной опасностью (НО) авторы понимают «всякий признанный или нанесенный на карту элемент или границу, которые могут представлять или очерчивать опасность для судна, либо ограничивать район плавания» (ИМО Резолюция А 529 (13) от 12.11.83 г).

К оцениваемым параметрам (показателям) навигационной безопасности при ведении боевых действий и плавании (НБП) корабля относятся:

1. вероятность $P_{\text{НБП}}=P(D \geq D')$ того, что корабль при движении мимо опасностей не сблизится ни с одной из них на расстояние D , меньшее установленного D' ;
2. минимальное расстояние D_m , при котором в конкретных условиях плавания вероятность $P_{\text{НБП}} \geq P'$, где P' — заданное значение вероятности НБП;
3. максимальная (допустимая) средняя квадратическая погрешность (СКП) $m_{\text{дп}}$ определения расстояния D , при которой в случае заданного D обеспечивается условие $P_{\text{НБП}} \geq P'$.

Документы международной ассоциации маячных служб [1] устанавливают вероятность, с которой должна обеспечиваться НБП в пределах от 0,95 до 0,999 в зависимости от типа судна, вида груза, фазы и условий плавания.

Оценка параметров НБП вблизи одиночной навигационной опасности

Первое вероятностное решение задачи НБП применительно к одиночной опасности или ситуации, когда 2–3 опасности составляют общую группу, осуществил А. П. Ковалев [2]. Это решение получило развитие в документах [3, 4] с учетом более подробно изученных свойств погрешностей морских средств навигации (МСН). Для случая расхождения с одной точечной опасностью показатели НБП рассчитывают по формулам [3]:

$$\left. \begin{aligned} D_m \geq \delta_{zh} = K_m m_{zh}; \\ P(D \geq D') = F_L(x); \\ x = D / m_{zh}; \\ D_m \geq \delta_{zh} = K_m \cdot m_{zh} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где δ_{zh} – верхняя доверительная граница предельной с заданной вероятностью P' линейной погрешности места корабля по оси z , направленной на опасность;

D_m – минимально допустимое расстояние до навигационной опасности;

D – текущее расстояние до навигационной опасности;

D' – заданное (рекомендованное) расстояние расхождения с опасностью;

K_m – коэффициент перехода от СКП m к предельной погрешности δ ;

m_z – линейная СКП места корабля по направлению на опасность (рассчитанная с учетом СКП положения опасности);

m_{zh} – ее верхняя доверительная граница, рассчитываемая в соответствии с [3];

$F_L(x)$ – функция распределения закона Лапласа (в варианте Кондрашихина [4]).

Форма закона распределения погрешностей навигационного комплекса (НК) зависит от структуры погрешностей, которая включает суточную составляющую с периодом $T_{сут}=24$ ч и амплитудой, принятой нами за единицу; шулеровской с периодом $T_{шул} \approx 1,4$ ч и случайной составляющей с характерным периодом $T^* \leq T_{шул}$ и амплитудой $A_{сл} \approx A_{шул} \approx 0,25A_{сут}$. В канале долготы некоторых типов НК к этим составляющим добавляется погрешность, возрастающая с постоянной или увеличивающейся скоростью (постоянный или гиперболический тренд погрешности). Каждой составляющей соответствует свой закон распределения: периодические составляющие имеют закон распределения гармонической функции (ГФ); случайная – промежуточный закон M -распределения [5] в интервале от закона Гаусса (Г) до закона Лапласа (Л) в зависимости от степени изменчивости СКП; погрешности постоянного тренда подчиняются закону равномерного распределения (Р), а гиперболического – экспоненциальному (Э). В результате смешения составляющих образуются сложные композиции законов распределения, которые еще более усложняются с реализацией метода протяженной коррекции (МПК).

Основной характеристикой формы этих законов распределения является эксцесс (E). Значения эксцесса перечисленных выше законов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента предельного перехода K_m в зависимости от эксцесса погрешности

Вероятность P'	Эксцесс погрешности и символ закона распределения											
	-1,2	-0,6	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,6	5,6
	Р		Г			М				≈Л	Э	Э
0,997	1,73	2,53	2,97	3,24	3,57	3,88	4,17	4,45	4,71	5,00	5,35	6,50
0,99	1,71	2,28	2,58	2,77	2,94	3,13	3,33	3,54	3,72	3,83	4,05	4,75
0,95	1,67	1,85	1,96	2,02	2,10	2,18	2,25	2,32	3,38	3,43	2,52	2,80
0,9	1,63	1,63	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64	1,65	1,65	1,65	1,65	1,66

Примечание: для закона гармонической функции $E=-1,5$; для $P'=0,997$ $K_m=1,41$.

Экспериментальные оценки эксцесса погрешностей широты $E_{Ш}$ и долготы $E_{Д}$, полученные в результате обработки материалов государственных испытаний двух типов НК высокой точности (НКВ) и графиков выходных навигационных параметров одного из типов НК средней точности (НКС), оказались равными (в скобках приведены значения верхних доверительных границ эксцесса для доверительной вероятности $P_{дв}=0,98$):

- для НКС $E_{Ш}=1,05, (2,12)$; $E_{Д}=1,9, (2,97)$;
- для НКВ₁ $E_{Ш}=-0,69, (0,38)$; $E_{Д}=5,76, (6,83)$; (2)
- для НКВ₂ $E_{Ш}=1,48, (2,55)$; $E_{Д}=-0,23, (0,84)$.

Разнообразие значений эксцесса определяется тем, что МПК, реализованный в НКВ, искажает форму закона первоначального распределения погрешностей, причем МПК в НКВ₂ более эффективен, чем в НКВ₁. Различие законов распределения погрешностей широты и долготы определяется отличием принципов выработки этих навигационных параметров (НП) и соответствующих им составляющих погрешностей. Верхняя доверительная граница для эксцесса рассматривается для того, чтобы компенсировать неопределенность, возникающую вследствие ограниченного времени наблюдений (134 ч для НКВ₁ и 142 ч для НКВ₂) и количества независимых измерений n при определении эксцесса. Доверительный интервал для эксцесса определяется выражением [6, 7]

$$E_l = \tilde{E} - \Delta_l \leq E \leq \tilde{E} + |\Delta_h| = E_h, \quad (3)$$

где Δ_l и Δ_h – квантили функции распределения величины E , соответствующие доверительной вероятности $P_{дв}$ и представленные в табл. 2 [7].

Таблица 2

Квантили Δ_l и Δ_h для расчета нижней и верхней доверительных границ для эксцесса [4]

Количество n	Доверительная вероятность									
	0,70		0,80		0,90		0,95		0,98	
	Δ_l	$ \Delta_h $	Δ_l	$ \Delta_h $	Δ_l	$ \Delta_h $	Δ_l	$ \Delta_h $	Δ_l	$ \Delta_h $
10	1,04	1,35	1,34	1,45	1,79	1,61	2,37	1,82	3,17	2,15
20	0,96	0,85	1,15	0,98	1,75	1,21	2,24	1,37	3,57	1,51
40	0,70	0,63	1,03	0,75	1,66	0,92	2,13	0,96	2,74	1,17
50	0,54	0,60	0,76	0,68	1,46	0,78	2,12	0,92	2,55	1,04
80	0,50	0,51	0,67	0,59	1,16	0,68	1,85	0,74	2,47	0,84
100	0,44	0,41	0,60	0,54	1,01	0,62	1,33	0,61	1,43	0,97
200	0,30	0,32	0,41	0,39	0,63	0,45	0,70	0,55	1,10	0,59
500	0,25	0,23	0,33	0,28	0,45	0,35	0,55	0,38	0,72	0,39

Поскольку в НК всех типов погрешности широты и долготы подчиняются не одинаковым законам распределения, то при строгом решении задачи НБП (а также и многочисленных задач навигационного обеспечения боевых действий кораблей, при решении которых рассчитываются предельные погрешности), в качестве предельной линейной погрешности места корабля δ_z по оси z , направленной под углом α к меридиану, принимают ее верхнюю доверительную границу, рассчитываемую в соответствии с теоремой о погрешностях функций [3] по формуле:

$$\delta_{zh} = \left[(K_{mш} m_{шh} \cos \alpha)^2 + (K_{mд} m_{дh} \sin \alpha)^2 + 2r (K_{mш} m_{шh} \cos \alpha) (K_{mд} m_{дh} \sin \alpha) \right]^{0,5}, \quad (4)$$

где $K_{mш}$ и $K_{mд}$ – коэффициенты перехода от СКП к предельной погрешности для каналов широты и долготы, выбираемые из табл. 1;

$m_{шh}$ и $m_{дh}$ – верхняя доверительная граница для СКП выработки НП в этих каналах;

r – коэффициент корреляции погрешностей широты и долготы, находится в пределах для всех НК 0,2–0,4.

Табл. 2 построена в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [6]. Применительно к НКС, СКП долготы которых изменяется во времени, второй член в выражении (4) имеет вид $[K_{mд} m_{дh}(t) \sin \alpha]^2$, где $m_{дh}(t)$ – функция изменения СКП во времени.

Убедимся в том, что рассматриваемый подход к определению предельной погрешности δ_{zh} имеет существенное значение. Для этого рассчитаем по результатам (2) среднеарифметическое значение для верхней доверительной границы эксцесса $E_{cp}=2,6$ и выберем из табл. 1 для $P'=0,997$

величину соответствующего коэффициента $K_{m\text{ ср}}=4,86$. Если задача решается традиционным способом [2] с использованием закона Гаусса, то $K_{m\text{ Г}}=2,97$, а отношение коэффициентов предельного перехода равно $4,86/2,97=1,6$, т. е. при необоснованном использовании закона Гаусса корабль может подойти к опасности в 1,6 раза ближе, чем допустимо. Сделаем три оговорки:

- эксцесс не обладает свойством аддитивности, поэтому нельзя использовать для расчетов НБП взятую для наглядности величину $K_{m\text{ ср}}$;
- величина $K_{m\text{ ср}}=2,6$ еще раз доказывает правильность использования в методике [3] закона распределения Лапласа (в варианте Кондрашихина) с $E\approx 3,5$;
- при решении некоторых навигационно-тактических задач требуется рассматривать *нижнюю* доверительную границу для величины δ_z .

Приведем выражение (4) к виду, удобному для расчетов. Обозначим $K_{m\text{ Ш}}m_{\text{Ш}h}=B_{\text{Ш}}$, $K_{m\text{ Д}}m_{\text{Д}h}=B_{\text{Д}}$ и $\Lambda=B_{\text{Д}}/B_{\text{Ш}}$. Тогда

$$\delta_{zh} = B_{\text{Ш}} \left[\cos^2\alpha + \Lambda^2 \sin^2\alpha + r\Lambda \sin 2\alpha \right]^{0,5} = B_{\text{Ш}} C, \quad (5)$$

где C – нормированный радиус-вектор подеры предельного эллипса погрешностей, равный выражению, обозначаемому квадратными скобками.

Практические расчеты облегчаются тем, что величины $K_{m\text{ Ш}}$, $m_{\text{Ш}h}$, $B_{\text{Ш}}$, $K_{m\text{ Д}}$, $m_{\text{Д}h}$, $B_{\text{Д}}$ и Λ для каждого конкретного НКВ постоянны, и расчеты величин $B_{\text{Ш}}$, $B_{\text{Д}}$ и Λ выполняются только один раз, а величина C зависит от величин Λ , r и угла α и может быть табулирована.

Если значение эксцесса неизвестно, следует в соответствии с методикой [3] использовать закон Лапласа. При этом для рассматриваемых НК в пяти случаях из шести обеспечивается некоторый запас расстояния до опасности, и в одном случае получается недостаток. При использовании закона Гаусса, наоборот, в пяти случаях возникнет недостаток расстояния и в одном – незначительный запас.

Для НКС задача усложняется необходимостью расчета при подготовке к походу шести или 12 значений $m_{\text{Д}h}(t)$, $B_{\text{Д}}(t)$ и $\Lambda(t)$ при дискретности времени 4 или 2 ч и составления таблицы величины $\Lambda(t)$. Таблица остается постоянной вплоть до изменения значений функции $m_{\text{Д}h}(t)$ по результатам анализа фактических невязок.

Расчеты всех параметров НБП требуют знания СКП вырабатываемых НП. Однако по результатам испытаний НК по каждому НП определяется и записывается в формуляр не СКП, а *максимальная погрешность* x_m (максимальная по модулю погрешность, наблюдавшаяся на государственных испытаниях). Переход от величины x_m к СКП m осуществляют по формуле

$$m=K_{\text{Г}}x_m \quad (6)$$

с выбором коэффициента K_{Π} из табл. 3. Здесь n – количество независимых измерений погрешностей, эквивалентное продолжительности наблюдений, произведенных на государственных испытаниях. Табл. 3 построена путем сопоставления функций распределения максимальной погрешности и СКП для числа n .

Таблица 3

Коэффициент K_{Π} перехода от максимальной погрешности к СКП

n	1	5	10	20	30	50	100	286
K_{max}	0,60	0,60	0,54	0,50	0,48	0,47	0,41	0,33

Оценка параметров НБП вблизи группы НО

Ситуация плавания вблизи группы ненаблюдаемых НО, расположенных с обеих сторон от линии пути корабля, возникает, например, при форсировании подводной лодкой в подводном положении пролива типа Корейского или Гибралтарского, или при проходе в защищенный район между берегом и минным заграждением и т. д. Расхождение со всеми опасностями группы осуществляется одновременно или почти одновременно, поэтому такую группу опасностей можно рассматривать как одну сложную НО.

В работе [2] параметры НБП при плавании вблизи сложной опасности предлагается рассчитывать по формуле

$$\left. \begin{aligned} D_{mj} &\geq R=K_M M ; \\ P(D \geq D') &= F_p(x) ; \\ x &= D / M, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

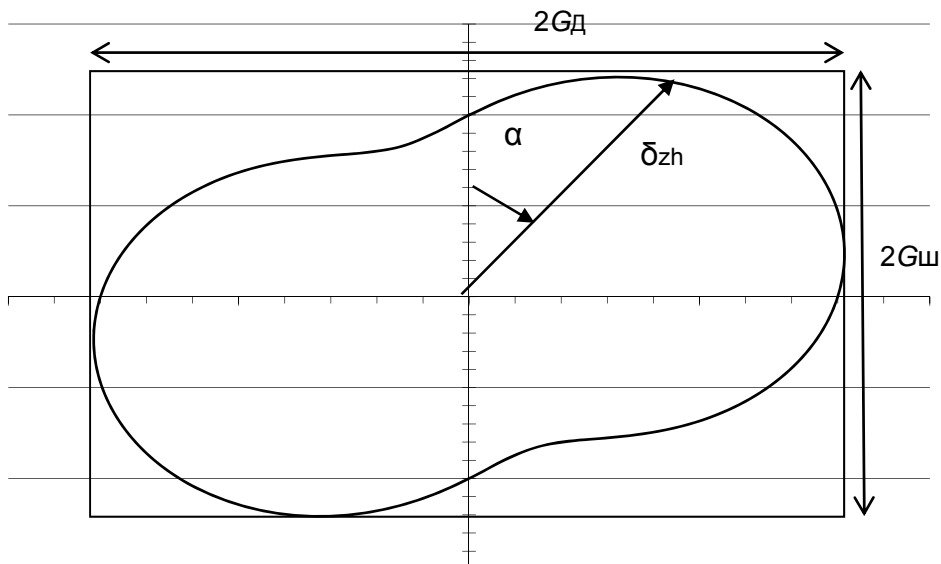
где D_{mj} – минимальное расстояние до j -ой опасности;

K_M – коэффициент предельного перехода от радиальной СКП M места корабля к радиальной предельной погрешности R ;

$F_p(x)$ – функция распределения закона Рэлея (в варианте Мотрохова), таблица которого имеется в Мореходных таблицах. Применительно к погрешностям НК закон Релея и коэффициент K_M неприемлемы из-за отличия законов распределения погрешностей широты и долготы от нормального и неодинаковости этих законов. Кроме того, при расчете по формуле (7) следовало бы использовать верхнюю доверительную границу для радиальной СКП M .

Наиболее простой из возможных строгих способов решения задачи НБП вблизи сложной НО основан на построении вокруг точек текущего или прогнозируемого местоположения корабля линии равных предельных линейных погрешностей $\delta_{zh}(\alpha)$ места корабля по всем направлениям α (см.

формулу (4). Величина $\delta_{zh}(\alpha)$ представляет собой радиус-вектор подеры предельного эллипса (ППЭ) погрешностей широты и долготы, вырабатываемых НК, и определяется для каждого угла α по формуле (4) или (5). Линия ППЭ для коэффициента корреляции $r=0,4$ и параметра $\Lambda=1,6$ представлена на рисунке.



Предельная подера эллипса и прямоугольник погрешностей (объяснения в тексте)

Условие НБП состоит в том, чтобы перемещающаяся вместе с кораблем (и с прогнозируемой точкой впереди по линии маршрута, например, в 5 минутах времени) линия ППЭ нигде не приближалась к опасностям ближе допустимого расстояния D' , т. е.

$$D_j \geq \delta_{zh}(\alpha_j) + D'_j \tag{8}$$

где D_j – текущее расстояние до j -ой НО. При автоматических вычислениях в навигационной вычислительной системе (НВС) непрерывно проверяется условие (8), а также рассчитывается ППЭ и выводится на дисплей для визуального контроля НБП. Минимальное допустимое расстояние D'_j представляет собой сумму

$$D'_j = D_{рдж} + \delta_{поj}, \tag{9}$$

где $D_{рдж}$ – минимальное допускаемое расстояние сближения с НО, определяемое руководящими документами; $\delta_{поj}$ – предельная с заданной вероятностью P' погрешность положения НО на бумажной или электронной

карте, определяемая в соответствии с работами [4, 5]. Величина D'_j может быть неодинаковой для разных НО, поэтому ее удобно откладывать от НО, а не включать в величину $\delta_{zh}(\alpha)$.

Ручные вычисления параметров НБП выполняют для предварительной проверки обеспеченности НБП и выбора наилучшего положения линии пути корабля между НО. Для этого в общем случае нескольких НО в составе сложной опасности на карте (планшете) строят прямоугольник погрешностей (ПП), описывающий линию ППЭ и заменяющий ее при ручных вычислениях. ПП характеризует двумерную погрешность места корабля (см. рисунок). Стороны ПП параллельны меридиану и параллели и равны $2G_{ш}$ и $2G_{д}$. Выражения для величин $G_{ш}$ и $G_{д}$ получены путем приравнивания нулю производных проекций радиуса-вектора ППЭ на координатные оси по α

$$d[\delta_{zh}(\alpha)\sin\alpha]/d\alpha = 0;$$

$$d[\delta_{zh}(\alpha)\cos\alpha]/d\alpha = 0.$$

Полученные выражения для максимальных значений проекций здесь не приводятся из-за их сложности. Стороны ПП определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} - \text{ при } B_{ш} > B_{д} (\Lambda < 1): G_{ш} &= B_{ш}; G_{д} = B_{ш}d; \\ - \text{ при } B_{ш} = B_{д} (\Lambda = 1): G_{ш} &= B_{ш}d; G_{д} = B_{ш}d; \\ - \text{ при } B_{ш} < B_{д} (\Lambda > 1): G_{ш} &= B_{ш}d; G_{д} = B_{ш}\Lambda, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где d – параметр, выбираемый из табл. 4, в которой он представлен в сотых долях; поэтому $d = d_m/100$; $B_{ш} = K_{mш}m_{шh}$; $B_{д} = K_{mд}m_{дh}$; $\Lambda = B_{д}/B_{ш}$.

Таблица 4

Параметр d , сотые доли

Коэффициент r	Параметр Λ										
	0,4	0,6	0,8	1,0	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1
0	65	62	80	100	100	110	112	123	136	150	164
0,4	63	74	89	106	112	121	132	144	157	170	184

При решении задачи НБП в процессе предварительной прокладки линию пути корабля прокладывают между опасностями так, чтобы ПП нигде не касался ограждающих линий, проложенных в расстоянии D' от НО. При этом условие (8) соблюдается с некоторым запасом. Если расстояние между опасностями слишком мало и условие (8) не может быть выполнено, то вновь рассчитывают ПП и/или линию ППЭ для меньшей заданной вероятности P' .

При необходимости интерполируют по вероятности величину K_m при ее выборе из табл. 1. Та вероятность P' , при которой обеспечивается равенство левой и правой частей в (8), есть *обеспечиваемая вероятность* НБП $P_{об}$ в рассматриваемых условиях.

Вероятность попадания точки местоположения корабля в ПП, построенный относительно счислимого места, равна вероятности попадания случайной точки в прямоугольник, образованный пересечением двух бесконечных полос шириной $2G_{ш}$ и $2G_{д}$ с вероятностью попадания в каждую из них P' или $P_{об}$. Следовательно, согласно теореме умножения вероятностей (и без учета корреляционной связи погрешностей широты и долготы) получим

$$P_{ПП}=P'^2 \text{ или } P_{ПП}=P_{об}^2. \quad (11)$$

Если провести окружность, описывающую ПП, получим круг погрешностей, радиус R которого является верхней доверительной границей для радиальной предельной погрешности, а вероятность попадания в который – $P_{кр} > P_{ПП}$. Точное выражение для вероятности $P_{кр}$ из-за сложной и неодинаковой формы законов распределения погрешностей широты и долготы получить невозможно.

Анализ табл. 4 показывает, что размеры ПП при коррелированных с $r=0,4$ погрешностях широты и долготы больше, чем при некоррелированных погрешностях, и разность достигает 18%. Поэтому коэффициент корреляции, если он превышает 0,1, необходимо учитывать при расчетах НБП, производя линейное интерполирование между значениями, выбираемыми из табл. 4.

В частном случае, когда сложная НО представляет собой правую ⁽¹⁾ и левую ⁽²⁾ границы прохода (например, пролива), вместо построения ПП следует рассчитать и проложить в направлениях, перпендикулярных линии пути, два радиуса-вектора ППЭ $\delta_{zh}(\alpha_1)$ при $\alpha_1=K+90^\circ$ и $\delta_{zh}(\alpha_2)$ при $\alpha_2=K+270^\circ$, где K – направление линии пути. В случае когда значения вероятности P' для первой и второй опасностей не одинаковы, величины $K_{mш}$ и $K_{mд}$ выбирают из табл. 1 при расчете предельных погрешностей $\delta_{zh}(\alpha_1)$ $\delta_{zh}(\alpha_2)$ для разных вероятностей P' .

Полученное в статье новое решения задачи определения параметров НБП при плавании пл вблизи одиночных и групповых опасностей может использоваться при ручных расчетах НБП и в программах НК.

ЛИТЕРАТУРА

1. МАМС Руководство по навигационному оборудованию (NAVGUIDE). – СПб, 2001. – 171 с.
2. Кораблевождение. Под ред. А. П. Ковалева. – Л.: ВСОК ВМФ, 1971. – 720 с.
3. Михальский В. А., Рябоконт В. А. Методики вероятностных расчетов при решении навигационных задач на кораблях и судах ВМФ (МВР-96). – СПб.: ГУНиО МО, 1999. – 218 с.
4. Кондрашихин В. Т. Определение места судна. – М., Транспорт, 1989. – 230 с.

5. Михальский В. А. Промежуточный закон М-распределения погрешностей навигационных измерений. Информационные технологии на транспорте. Сб. научных трудов СПГУВК. – СПб.: Политехника, 2003 С. 101–105.
6. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 1979. – 511 с.
7. Михальский В. А., Тюлькин М. В. Использование эксцесса и асимметрии в критериях вида закона распределения погрешностей. – В сб. – СПб.: ВСОК ВМФ, 2004. С. 58–64.

Evaluation of Navigation Safety for Submarine Navigation near the Point Dangers

V. A. MIKHALSKY (GNINGI, RF MoD),
M. V. TYULKIN (The Navy Higher Special Officers' Classes)

Recommendations concerning the calculation of navigation safety parameters for submarines equipped with inertial navigation systems near the point dangers to navigation and in the area where the groups of point dangers to navigation are located, are substantiated. Tables for practical calculations are presented.

ГРНТИ 78.21.41.

ОЦЕНКА НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДВОДНОГО ПЛАВАНИЯ ВБЛИЗИ МНОЖЕСТВЕННЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ОПАСНОСТЕЙ

В. А. МИХАЛЬСКИЙ (ГНИНГИ МО РФ),
М. В. ТЮЛЬКИН (ВСОК ВМФ),
А. Ю. ЧУМАКОВ (ГНИНГИ МО РФ)

Решена задача оценивания навигационной безопасности при плавании вблизи множественных и протяженных навигационных опасностей на основе задачи о выбросах случайного процесса погрешностей. Рассчитаны таблицы, обеспечивающие практическое решение задачи.

Под множественной навигационной опасностью (НО) авторы понимают несколько единичных НО на одном участке маршрута, с которыми корабль расходится по отдельности. В качестве протяженной опасности рассматривают одну или несколько ограничивающих линий, состоящих из бесконечного количества точек. Например, границы фарватера подводных лодок, назначенной полосы движения, ограниченного района маневрирования, ровная линия опасной изобаты и т. п.

Первое в кораблевождении решение задачи навигационной безопасности плавания (НБП) при множественной опасности дал В. Т. Кондрашихин [1].

$$P_{i1} = P_{(1)}^n, \quad (1)$$

где $P_{(1)}$ – вероятность НБП при расхождении с единичной НО, принимаемая обычно для всех n НО постоянной; n – количество отдельных НО,

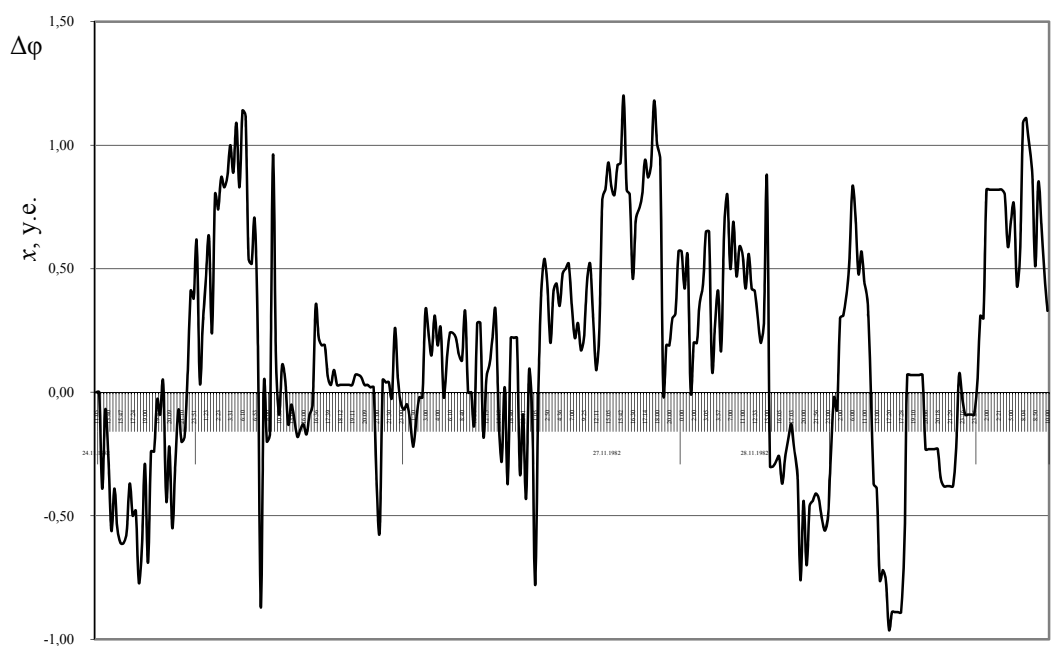
составляющих множественную опасность. Оценка вероятности НБП (1) имеет два важных недостатка:

а) с увеличением числа n вероятность $P_{\text{мн}}$ быстро уменьшается, достигая нереально малых значений, противоречащих всему опыту плавания кораблей и судов. Так, при $P_{(1)}=0,99$ и n , равном 10, 50 и 100, вероятность $P_{\text{мн}}$ равна 0,9; 0,5 и 0,36;

б) формула (1) не позволяет решить задачу при протяженной опасности с бесконечным числом точек и не дает ответа на вопрос о возможности ограничения числа n . Если, например, корабль утром выходит из базы, проходя мимо $n_{\text{У}}=3$ ненаблюдаемых НО, а вечером возвращается, то нужно ли вечером считать $n_{\text{В}}=n_{\text{У}}=3$, или $n_{\text{В}}=2n_{\text{У}}=6$? И как быть на следующий день, если плавание продолжается в таком же режиме?

В работе [2] с целью преодоления первого недостатка для оценки вероятности НБП вблизи множественной опасности использована теорема о повторении опытов в искусственно искаженном виде, дающая, по нашему мнению, ошибочный результат. И вообще использование теоремы о повторении опытов в данном случае непродуктивно, так как при корректном решении она приводит к теореме умножения вероятностей.

Оба подхода к решению задачи НБП, реализованные в работах [1, 2], рассматривают погрешности определения местоположения корабля как случайные величины X и Y , а события, состоящие в благополучном расхождении с одиночными НО, как независимые случайные события. Время как один из важных параметров в решении задачи НБП не рассматривается. Это является основополагающим недостатком обоих подходов, не позволяющим решить поставленную задачу. На самом деле погрешности определения координат корабля являются *случайными процессами* $X(t)$ и $Y(t)$, где t – время. Для иллюстрации этого на рисунке приведен график изменения погрешностей широты одного из типов НК в условных единицах (у. е.). Порожденные погрешностями $X(t)$ и $Y(t)$ колебания траектории движения корабля относительно линии назначенного пути являются двумерным случайным процессом. Этот процесс целесообразно разложить на две составляющие, одна из которых направлена по линии пути корабля, вторая – перпендикулярно к линии пути и представляет основную опасность с точки зрения задачи НБП. В частных случаях, когда курс направлен по меридиану или параллели, главную опасность представляют погрешности выработки долготы (Д) или широты (Ш). Это позволяет ограничиться рассмотрением случайных процессов погрешностей выработки навигационных параметров (НП) – широты и долготы.



Изменение погрешности широты НК

Аварийная ситуация в общем случае имеет место, если нарушается условие работы [1]

$$D_m - D' \geq \delta_{zh} = K_m m_{zh}, \quad (2)$$

где D_m - минимальное расстояние от корабля до НО, при котором в данных условиях плавания обеспечивается заданная вероятность НБП P' ;

D' - минимальное установленное расстояние для сближения с НО;

δ_{zh} - верхняя доверительная граница предельной с заданной вероятностью P' линейной погрешности места корабля по оси z , направленной на опасность;

K_m - коэффициент предельного перехода от СКП m к предельной погрешности δ , определяемый с помощью Мореходных таблиц;

m_{zh} - верхняя доверительная граница линейной СКП места корабля m_z по направлению на опасность, рассчитываемая в соответствии с методикой изложенной в работе [3].

Нарушение условия (2) происходит, когда при плавании вблизи опасности погрешность НП x_i превышает уровень, принятый при расчете предельной погрешности $\delta_{zh} = K_m m_{zh}$, i - символ момента времени; коэффициент K_m является функцией заданной вероятности НБП P' . Выход случайного процесса $X(t)$ за некоторый уровень $\pm a$ называют *выбросом* [4]. Таким образом, касание грунта или пересечение границы фарватера

происходит в результате выброса случайного процесса погрешностей НП за уровень, которому соответствует коэффициент K_m .

Применительно к решению задачи НБП больше всего нас интересуют три параметра процесса выбросов: средний промежуток времени между выбросами t_b^* , средняя продолжительность выброса τ^* и вероятность P_B появления выброса в продолжение времени t . Эти параметры можно определить на основании задачи о выбросах теории случайных функций [5] или на базе теории надежности, изучающей отказы технических средств. Мы для решения задачи НБП воспользуемся результатами обеих теорий, дополняющих одна другую.

В теории случайных функций применительно к стационарному гауссовскому (нормальному) случайному процессу $X(t)$ получены следующие выражения для среднего времени t_b^* пребывания процесса $X(t)$ выше нормированного уровня $b=a/m$; среднего числа n_b^* выбросов в течение времени t ; средней продолжительности выброса τ_b^* за уровень b и среднего числа выбросов в единицу времени ν_b^* :

$$t_b^* = t \int_b^{\infty} f(x) dx ;$$

$$n_b^* = t \int_0^{\infty} \nu f(b, \nu) d\nu ;$$

$$\tau_b^* = t_b^* / n_b^* ;$$

$$\lambda_b^* = n_b^* / t ,$$

где $f(x)$ и $f(b, \nu)$ – плотности распределения ординат процесса $X(t)$ и их производных (скоростей ν). Решение второго интеграла приводит к выражению

$$\nu_b^* = \frac{\sigma_\nu}{m_x 2\pi} E_a , \tag{3}$$

где

$$E_a = \exp\left[-(a - M_x)^2 / 2m_x^2\right] = E_b = \exp(-b^2/2) ,$$

где σ_ν – среднее квадратическое отклонение (СКО) скорости изменения ординат процесса $X(t)$; $m_x = m$ – СКП процесса $X(t)$; математическое ожидание M_x процесса без потери общности принято равным нулю. С учетом формулы (3) другие параметры распределения выбросов равны

$$\begin{aligned}
 n_b^* &= v_b^* t; \\
 \tau_b^* &= \pi(m/\sigma_v) E_b [1 - F_\Gamma(b)]; \\
 t_b^* &= v_b^* t \tau_b^*; \\
 t_B^* &= 1/v_b^*,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где $F''_\Gamma(b)$ – двусторонняя функция распределения закона Гаусса; E' – величина, определяемая по выражению (3) при положительном показателе степени экспоненты.

Величина σ_v связана с автокорреляционной функцией (АКФ) $\rho(\tau)$ процесса $X(t)$, отражающей структуру погрешностей процесса $X(t)$. Здесь τ – промежуток времени, для которого рассчитывается АКФ.

Структура погрешностей ИНС и НК включает следующие составляющие [5]:

- периодическую суточную с характерным периодом $T^*=24$ ч, характерной частотой $\beta=2\pi/T^*=0,262$ ч⁻¹ и средней амплитудой, принимаемой за единицу $A^*=1$;
- периодическую шулеровскую с $T^*_{шл}=1,4$ ч; $\beta_{шл}=4,488$ ч⁻¹ и $A^*_{шл}\approx A^*/3$;
- случайную с $T^*_{сл}\approx(0,1-0,3)T^*_{шл}$; $A^*_{сл}\approx A^*_{шл}\approx A^*/3$;

Такой модели погрешностей НК согласно теории случайных функций [4] соответствует АКФ вида

$$\rho(\tau) = A_1 \exp(-\alpha_1 \tau) \cos \beta \tau + A_2 \exp(-\alpha_2 \tau); \tau > 0,
 \tag{5}$$

где A_1 и A_2 – параметры, определяющие распределение дисперсии случайного процесса $X(t)$ между периодической и случайной составляющими; α_1 и α_2 – фактор затухания амплитуды периодической составляющей и случайной составляющей; $\beta=2\pi/24$ ч⁻¹ – частота суточной составляющей. Параметры выражения (5), полученные экспериментально по материалам испытаний НК высокой точности и графикам разностей выходных навигационных параметров (ГРВНП) для НК средней точности равны:

$$\begin{aligned}
 &\text{для НКС } A_1=0,22; \alpha_1=0; \beta=0,262 \text{ ч}^{-1}; A_2=0,78; \alpha_2=0,40 \text{ ч}^{-1}; \\
 &\text{для НКВ}_1 A_1=0,75; \alpha_1=0,083 \text{ ч}^{-1}; \beta=0,262 \text{ ч}^{-1}; A_2=0,25; \alpha_2=1,75 \text{ ч}^{-1}; \\
 &\text{для НКВ}_2 A_1=0,40; \alpha_1=0,089 \text{ ч}^{-1}; \beta=0,262 \text{ ч}^{-1}; A_2=0,60; \alpha_2=2,90 \text{ ч}^{-1}.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Необходимо отметить, что данные по НКС являются ориентировочными в силу ограниченности и приближенности исходных данных.

Из выражений (5) и (6) видно, что АКФ включает две составляющие: медленно затухающую периодическую (экспоненциально-косинусную) и экспоненциальную (случайную). Имеющееся в теории случайных функций [4] решение задачи о выбросах получено для каждой из этих составляющих и

дает величины СКО σ_v скорости изменения ординат случайного процесса $X(t)$ соответственно для экспоненциально-косинусной и экспоненциальной АКФ:

$$\sigma_v = m_x (\alpha^2 + k^2 \beta^2)^{0,5} \text{ и } \sigma_v = m_x \alpha, \quad (7)$$

где $k=0,95$ – коэффициент эквивалентного перехода от недифференцируемой в нуле функции (5) к экспоненциально-косинусно-синусной дифференцируемой функции. Таким образом, имеются данные, необходимые для расчета параметров выбросов случайного процесса $X(t)$ на основании теоретического решения задачи. Однако остается неясным, какой вид АКФ из двух возможных принять для расчетов, и по какому принципу производить аппроксимацию исходной АКФ.

Поэтому произведем, ориентируясь на результаты теории надежности, обработку и анализ имеющихся экспериментальных материалов с целью получения статистических оценок параметров распределения выбросов погрешностей координат НКВ₁ и НКВ₂. Материалы представляют собой выборки погрешностей широты (Ш) и долготы (Д), полученные с дискретностью 20–30 мин. на испытаниях НК в течение времени $t=134,4$ ч (НКВ₁) и $t=141,2$ ч (НКВ₂). По этим выборкам по условию превышения погрешностью $X(t)$ уровня a

$$X(t) > a \text{ или } -X(t) < -a$$

определены моменты T_{Hi} и T_{Ki} начала и окончания i -го выброса на каждом уровне a и рассчитаны значения длительности выброса $t_i = T_{Ki} - T_{Hi}$ и времени между началами выбросов $t_{Bi} = T_{Hi} - T_{Hi-1}$. По этим значениям для каждого нормированного уровня $b = a/m$ рассчитаны оценки суммарного времени τ_b пребывания процесса $X(t)$ выше уровня b , средних значений длительности выброса \tilde{t}_b , промежутка времени между выбросами t_b , и СКО этих величин $\sigma(\tau)$ и σ_{t_b} . Величина, обратная t_b , дает экспериментальную оценку интенсивности выбросов $\lambda = 1/\tilde{t}_b$. Перечисленные оценки приведены в табл. 1. Они позволяют на основании выводов теории надежности рассчитывать вероятность отсутствия выбросов за время t .

К сожалению, объем экспериментальных данных не позволил получить оценки указанных параметров в области больших значений b , что требуется для решения задачи НБП. Это вынуждает проводить экстраполяцию параметров на область больших b . Для обеспечения экстраполяции напишем выражение для интенсивности выбросов с учетом формул (4) и (7)

$$\lambda_b = LE_b, \quad (8)$$

где $L=K/2\pi$; $K=(\alpha^2+k^2\beta^2)^{0,5}$ при экспоненциально-косинусной АКФ или $K=\alpha$ при экспоненциальной АКФ. Поскольку L не зависит от уровня b , то на

основании приведенных в табл. 1 оценок \tilde{t}_b и $\tilde{\tau}_b$ могут быть рассчитаны усредненные значения L^* . Для этого вначале найдем значения λ_b по формуле

$$\lambda_b = \tilde{\tau}_b / \tilde{t}_b t,$$

полученной из выражения (4), рассчитаем по формуле (8) $L_j = \lambda_b t / E_b$ и определим среднее значение

$$L^* = \sum_1^N L_i / N,$$

где N – количество уровней b , для которых получены оценки \tilde{t}_b и $\tilde{\tau}_b$. Теперь по (8) с подстановкой L^* вместо L рассчитаем искомые значения интенсивности выбросов λ_b и среднего времени между выбросами $t_B = 1/\lambda_b$ для более высоких b . Результаты расчетов также приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценки параметров выбросов и результаты расчетов

Вид НК, НП	b	Статистические оценки						Результаты расчетов		
		t_b , мин	\tilde{t}_b , мин	$\sigma(\tau)$, мин	n	t_b , ч	σ_{tB} , ч	L^*	λ_b , ч ⁻¹	t_B , ч
НКВ ₁ , широта $t=134$ ч	1	1278	71	75	18	8	6	0,242	0,147	6
	1,5	414	38	39	10	13	12		0,079	13
	2	40	8	6	5	33	36		0,033	30
	2,5								0,011	94
	3								0,003	376
	4									13800
НКВ ₁ , долгота, $t=134$ ч	1	1484	74	72	20	7	9	0,197	0,120	8
	1,5	517	52	20	10	12	12		0,064	16
	2	105	26	17	4	33	35		0,027	38
	2,5	67	33	17	2	77	-		0,009	115
	3								0,002	462
	4									16924
НКВ ₂ , широта $t=141$ ч	1	247	25	39	10	14	26	0,081	0,049	21
	1,5	10	5	0	2	71	0		0,026	38
	2								0,011	92
	2,5								0,004	284
	3								0,001	1135
	4									41600
НКВ ₂ , долгота $t=141$ ч	1	608	34	32	21	9	10	0,124	0,075	13
	1,5	175	25	33	7	20	12		0,040	15
	2								0,017	60
	2,5								0,005	183
	3								0,001	732
	4									64000

Жирным шрифтом в таблице выделены значения среднего времени между выбросами $t_{\text{В}}^*$ для больших уровней b . Видно, что это время достаточно велико. Однако значения $t_{\text{В}}^*$ получены при не очень большом числе измерений. Поэтому с учетом высокой ответственности решения задачи НБП определим значения нижней доверительной границы для величины $t_{\text{В}}^*$. Для обеспечения решения этой задачи по экспериментальным данным рассчитаны и представлены в табл. 1 значения СКО $\sigma_{t_{\text{В}}}$. Приближенную оценку нижней 95%-й доверительной границы для $t_{\text{В}}^*$ найдем в предположении нормального распределения величины $t_{\text{В}}$ (за неимением возможности уточнить закон ее распределения) по обычной для этой задачи формуле [6]

$$t_{\text{В}1}^* = \tilde{t}_{\text{В}} - 2\sigma_{t_{\text{В}}}.$$

Для перехода от эмпирических значений $t_{\text{В}1}^*$ к экстраполированным величинам $t_{\text{В}1}$ при больших значениях b рассчитали доверительное отношения $Q = t_{\text{В}1}^* / t_{\text{В}}^*$, которое в среднем по всем данным оказалось равным $Q = 0,5$. Предполагая, что это отношение сохраняется и для экстраполированных значений, получим и сведем в табл. 2 приближенные оценки нижней доверительной границы среднего времени между выбросами $t_{\text{В}}^* = Q t_{\text{В}1}^*$.

Таблица 2

Значения нижней доверительной границы среднего времени между выбросами (сутки) за уровень b

Уровень b	НКВ ₁		НКВ ₂	
	широта	долгота	широта	долгота
2,5	2,0	2,4	5,9	3,8
3	7,8	9,6	23,5	15,3
4	287,5	340,0	866,7	1333,3

Из табл. 2 видно, что нижняя доверительная граница среднего промежутка времени между выбросами случайных процессов погрешностей выработки координат НКВ уже при $b=2,5$ (чему соответствует вероятность $P=0,988$) не опускается ниже 2 суток, а при $b=3$ – ниже 7, 8 суток. Следовательно, с большой вероятностью можно предполагать, что выбросы в среднем будут происходить не чаще, чем один раз в 2 и \approx 8 суток. При этом учитывая наличие в структуре погрешностей НК суточной составляющей, можно утверждать, что, во всяком случае, выбросы за уровень $b \geq 2,5$ не могут происходить чаще, чем один раз в сутки.

Отсюда следует важный для решения задачи НБП вывод: при оценивании параметров НБП вблизи множественной и/или протяженной

опасности следует принимать во внимание не количество опасностей, а соотношение продолжительности T плавания вблизи опасности и времени $t_{вг}^*$. При этом вероятность НБП $P_{мн}$ нужно рассчитывать на основании теоремы умножения вероятностей по формуле (1), в которой принимать показатель степени n равным округленной в большую сторону величине

$$n = T/t_{вг}^* \quad (9)$$

При этом значительная приближенность используемых величин компенсирована рассмотрением нижней доверительной границы для среднего времени между соседними выбросами $t_{вг}^*$.

Сопоставим приведенные в табл. 2 данные с результатами теоретических расчетов по формулам (3) и (4) с учетом выражения (7) для НКВ₁, приняв среднее значение $\alpha=1,25$. В таком случае получается для $b=2,5$ величина $t_{вг}^*=2,4$ сут., для $b=3$ величина $t_{вг}^*=5,1$ сут. Учитывая, что значение $\alpha=1,25$ принято произвольно и не обязательно обеспечивает наилучшую аппроксимацию АКФ, можно признать значения $t_{вг}^*=(2,4$ и $5,1)$ не противоречащими табличным данным, что косвенно подтверждает корректность полученных выше результатов.

Перейдем к оценке вероятности выбросов за время t . Анализ физической природы погрешностей НК (трех упомянутых выше составляющих) позволяет принять, что на большом интервале времени $t \geq 24$ ч случайный процесс $X(t)$ является стационарным и, как следствие этого, поток выбросов обладает свойствами стационарности, отсутствия последствия и ординарности. Следовательно, поток выбросов является при сделанных предположениях простейшим потоком событий. Для простейшего потока вероятность возникновения l выброса за время t рассчитывают по закону Пуассона [6]

$$P_l(t) = \frac{(\lambda t)^l}{l!} e^{-\lambda t}.$$

В частности, больше всего интересующая нас вероятность отсутствия выбросов за время t равна (при $l=0$)

$$P_0(t) = e^{-\lambda t}, \quad (10)$$

что совпадает с выражением для вероятности безотказной работы технических средств [5] (выброс случайного процесса погрешностей однозначно совпадает с понятием так называемого перемежающегося отказа).

В табл. 3 приведено несколько значений вероятности отсутствия выбросов за 24 ч.

Таблица 3

Вероятность отсутствия выбросов в течение 24 часов

λ	0,07	0,04	0,01	0,008	0,005	0,002	0,0009
$P_0(24)$	0,186	0,383	0,707	0,825	0,887	0,953	0,979

Жирным шрифтом в таблице выделены значения, в среднем соответствующие уровню $b=3$. Видно, что уровень $b=3$ обеспечивает вероятность НБП, равную $P_{06}=0,95$. Этот результат почти точно совпадает со средним значением обеспечиваемой вероятности $P_{06}=0,94$, получаемой по табл. 1 работы [7] для среднего эксцесса ($E^*=2,6$). Таким образом, решение задачи НБП с использованием параметров закона распределения погрешностей НК и с использованием показателей распределения выбросов этих же погрешностей привело к одинаковому результату, что свидетельствует о достаточно высоком качестве проведенного исследования.

Решим вопрос о расчетах параметров НБП при переходе корабля с одного участка маршрута движения на другой. До сих пор навигация не имеет ответа на вопрос, как, например, определять параметры НБП на поход, если корабль проходит по фарватеру (первый участок маршрута) в назначенный полигон, маневрирует в нем (второй участок маршрута) и возвращается по фарватеру (третий участок). Еще более распространенный пример: корабль на выходе из базы минует n ненаблюдаемых НО (первый участок маршрута), маневрирует вдали от НО или совершает межбазовый переход (второй участок) и заходит в базу мимо тех же (n) или других (n') НО (третий участок). Вопрос состоит в том, принимать ли при оценке параметров НБП на третьем участке число опасностей n (n'), или $2n$ ($n+n'$), т. е. учитывать или нет опасность плавания на первом участке.

Ответим на этот вопрос с двух взаимосвязанных позиций. Во-первых, в теории надежности [7] вероятность $P_{БР}$ безотказной работы аппаратуры рассчитывается по формуле (10), где $\lambda=1/t_0$ – интенсивность отказов, t_0 – среднее время наработки на отказ. В теории надежности доказано положение о том, что при $\lambda=const$ ни эта вероятность, ни время работы до отказа при j -м включении аппаратуры не зависит от того, сколько раз включалась аппаратура ранее и сколько времени работала при $j-1$, $j-2$ включении и т. д. Накопления времени наработки не происходит. Это доказательство можно распространить на теорию НБП, благодаря идентичности законов изменения вероятностей отказов и вероятностей выбросов.

Во-вторых, в соответствии с работой [6] показательный закон распределения вероятностей (10) является достаточным условием, чтобы считать протекающий в физической системе процесс, описываемый этим законом, *марковским процессом* (или процессом без последствия). При марковском процессе вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от состояния системы в настоящий момент и не зависит от

того, каким образом система пришла в это состояние. Поэтому, если корабль благополучно подошел, например, к третьему участку маршрута, то рассчитывать вероятность НБП на нем нужно без учета всей предыстории, связанной с первыми двумя участками.

Следовательно, при определении параметров НБП на поход не следует рассчитывать совокупные параметры НБП по всему маршруту плавания, а ограничиться их оценением для отдельных участков маршрута, на которых имеются ненаблюдаемые навигационные опасности.

Полученные в статье новые решения задачи определения параметров НБП при плавании пл вблизи множественных и протяженных опасностей на основании закона Пуассона и интенсивности выбросов случайного процесса погрешностей НК, может использоваться при ручных расчетах НБП и в программах НК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондрашихин В. Т. Определение места судна. – М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
2. Груздев Н. М. Навигационная безопасность плавания. – СПб.: Военно-морской институт, 2002. – 221 с.
3. Методики вероятностных расчетов при решении навигационных задач на кораблях и судах ВМФ (МВР-96) / Михальский В. А., Рябоконе В. А. – СПб.: ГУНиО МО, 1999. – 218 с.
4. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 463 с.
5. Маликов И. М. Надежность судовой электронной аппаратуры и систем автоматического управления. – Л.: Судостроение, 1967. – 315 с.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
7. Михальский В. А., Тюлькин М. В. Оценка навигационной безопасности подводного плавания вблизи точечных опасностей // Навигация и гидрография. – 2006. – № 23. – 19 с.

Evaluation of Navigation Safety for Submarine Navigation near the Multiple and Extensive Dangers

V. A. MIKHALSKY, A. Y. CHUMAKOV (GNINGI, RF MoD),
M. V. TYULKIN (the Navy Higher Special Officers' Classes).

The problem of evaluating the navigation safety when sailing near the multiple and extensive dangers to navigation, based on the problem of outliers for random errors process, is solved. The tables providing the practical solution of the problem are composed.

ОБ ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ**Б. Е. ИВАНОВ**
(ГНИНГИ МО РФ)

В статье рассматривается возможность и целесообразность использования распределения экстремальных погрешностей для оценки степени навигационной безопасности плавания.

При оценке вероятности навигационной безопасности плавания (НБП) ранее использовалось нормальное распределение погрешностей измерения навигационных параметров [1]. Однако фактическое распределение погрешностей отличается от нормального; большие по модулю погрешности встречаются чаще, чем при нормальном распределении [2, 3]. Поскольку такие погрешности оказывают основное влияние на безопасность плавания, то для оценки вероятности НБП рекомендуется использовать распределение Лапласа [4, 5]. В этом случае погрешности, превышающие три средние квадратические погрешности (СКП), будут появляться в 9 раз чаще, чем при нормальном распределении. Вслед за распределением Лапласа было предложено использовать распределение экстремальных погрешностей для решения навигационных задач [6]. Возможность и целесообразность использования этого распределения для оценки степени НБП является предметом рассмотрения в данной статье.

1. Использование распределения экстремальных погрешностей непосредственно для оценки степени НБП впервые предложил Н. М. Груздев в 1997 г. [7]. В статье [7] наибольшие погрешности определены как «погрешности, составляющие или превышающие две СКП». Математическое ожидание наибольшей погрешности принято равным нулю, а ее среднее квадратическое отклонение (СКО) – в два-три раза превышающим СКО исходного нормального распределения [7]. На основе работы [8] в качестве модели наибольшей погрешности x было предложено использовать двойное экспоненциальное распределение (ДЭР), функция распределения Φ которого равна

$$\Phi(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x-q)]\}, \quad (1)$$

где α и q – параметры ДЭР, которые определяются путем обработки нескольких серий обычных (неэкстремальных) погрешностей с одинаковым числом n погрешностей в каждой серии.

С учетом формулы (1) были предложены зависимости для оценки вероятностей НБП вблизи опасной изобаты и по фарватеру при разовом определении места. Каждая из упомянутых вероятностей получила два

значения при одних и тех же условиях плавания. Был сделан вывод, что «наиболее гарантированные результаты навигационных расчетов получаются при использовании двойного экспоненциального распределения», с учетом которого требования к точности определения места будут выше, чем при нормальном распределении [7]. На основании этого вывода было предложено использовать ДЭР вместо нормального распределения.

2. В статьях [9–11] проанализированы положения статей [7, 12, 13]. Отмечено, что наибольшая погрешность определяется как *крайняя* (имеющая наибольшее значение) погрешность в серии погрешностей, а не путем сравнения с СКП. Наибольшая погрешность может быть меньше СКП и даже получить отрицательное значение, особенно при малом числе n погрешностей в серии. Математическое ожидание наибольшей погрешности существенно *увеличивается* с увеличением числа n , а ее СКО *уменьшается*.

Вероятность НБП вблизи опасной изобаты может оцениваться по формуле (1). При этом получается только *одно значение* вероятности. Безопасность плавания по фарватеру зависит от двух экстремальных погрешностей: наибольшей погрешности и наименьшей (в алгебраическом смысле) погрешности, что *не позволяет* использовать формулу (1). Для оценки вероятности НБП по фарватеру необходимо учитывать совместную плотность распределения указанных погрешностей из работы [8]. В связи с использованием экстремальных погрешностей обе вероятности относятся к случаю *многократного* определения места при разовом проходе мимо нескольких навигационных опасностей или многократном проходе мимо одной навигационной опасности. Число определений места должно точно соответствовать числу n погрешностей в серии. При этом обязательно должны соблюдаться гипотетические условия плавания, когда СКП места и расстояние до навигационных опасностей постоянны, а сами определения места независимы.

При решении рассматриваемой задачи может использоваться функция распределения наибольшей погрешности

$$\Phi(x) = F(x)^n, \quad (2)$$

где $F(x)$ – функция исходного распределения, в качестве которого может применяться нормальное распределение погрешностей.

Формулы (1) и (2) описывают распределение наибольшей погрешности. При этом формула (2) представляет собой точную зависимость, а формула (1) – ее аппроксимацию, то есть приближенную зависимость [8].

Достоверность положений статей [9–11] была доказана на основе работы [8] и результатов, полученных методом статистического моделирования.

В последующих работах Н. М. Груздева [12, 13] критический анализ, выполненный в статьях [9–11], не был признан. Однако ни одно из положений

статьи [7] не было учтено в его новых работах [14–16], которые рассматриваются в следующих пунктах данной статьи.

3. В работах [15, 16] дается определение: «Наибольшими погрешностями в сериях случайных погрешностей считаются такие, абсолютные значения которых $|\pm\Delta_m| = z$ превышают модули всех других погрешностей данной серии». Прежде всего следует отметить, что символ $|\pm\Delta_m|$ непонятен. Если Δ_m – наибольшая погрешность, которая может иметь как положительное, так и отрицательное значение, то причем тут знак \pm ? Далее, такая формулировка противоречит теории экстремальных значений, которую часто называют теорией крайних значений [8]. Экстремальная величина должна выбираться с *одного* края серии, а здесь предлагается выбирать с *двух* краев. Такая погрешность подчиняется двумодальному распределению, которое не может быть аппроксимировано ДЭР.

Кроме того, за функцию распределения наибольшей погрешности выдается функция распределения *другой* величины – наибольшего модуля погрешности z . Строго говоря, эта новая величина не может подчиняться ДЭР, поскольку наибольший модуль погрешности изменяется от 0 до $+\infty$, а аргумент ДЭР – от $-\infty$ до $+\infty$.

4. В отличие от статьи [7], в работах [15, 16] уже не упоминается вероятность НБП, а предлагает вычислять «вероятность появления погрешности, превышающей заданную наибольшую», по формуле

$$P=1-\Phi(z), \quad (3)$$

где $\Phi(z)$ соответствует формуле (1) при подстановке в нее z вместо x .

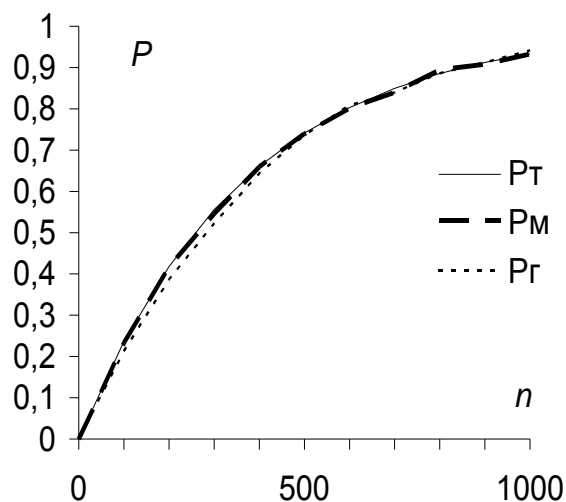
Выражение (3) не соответствует не только вероятности НБП, но и вероятности появления наибольшей погрешности, превышающей заданную погрешность, которая в работах [15, 16] принимается равной расстоянию до ближайшей навигационной опасности. Величина P является вероятностью появления наибольшего модуля погрешности, превышающего расстояние до навигационной опасности, и может лишь как-то характеризовать НБП только строго посередине фарватера (или посередине между двумя навигационными опасностями) при гипотетических условиях плавания, которые отмечены в пункте 2.

Предлагается странная процедура, которая включает: статистическое моделирование серий случайных погрешностей, выбор наибольших погрешностей, вычисление параметров ДЭР и вычисление вероятности P с учетом расстояния до навигационной опасности. Зачем вычислять параметры ДЭР в работах [15, 16] не объясняется. Это совершенно лишнее действие, т. к. вероятность P можно оценить напрямую путем статистического моделирования, а еще проще – путем использования формулы (2).

Для доказательства ошибочности рассмотренных предложений вычислены значения P для трех вариантов: по процедуре из работ [15, 16] P_{Γ} ,

путем статистического моделирования напрямую без применения ДЭР P_M и по точной формуле (2) P_T . Изменение полученных значений P в зависимости от n показаны на рисунке для расстояния до навигационной опасности, равного трем СКП места (сплошная линия для P_T , штриховая для P_M , точечная для P_T).

Из рисунка видно, что значения P_T , P_M и P_T достаточно близки друг к другу. Следовательно, с одной стороны, для получения P нет никакой необходимости использовать ДЭР и процедуру, предложенную в работах [15, 16], достаточно вычислять P по точной формуле (2). С другой стороны, подтверждается вывод о том, что формула (2), так же как формула (1), характеризует экстремальную погрешность, что ошибочно отвергалось в работах [12, 13].



Изменение вероятности P в зависимости от числа n погрешностей в серии

Кроме того, по результатам вычислений получено отношение $P(n)/P(25)$ вероятности $P(n)$ при заданном числе n погрешностей в серии к вероятности $P(25)$ при $n=25$. Значения этого отношения приведены в таблице при расстоянии до навигационной опасности, равном от трех до пяти СКП места m , и при четырех значениях n , включая $n \rightarrow \infty$.

Изменение отношения вероятностей $P(n)/P(25)$ в зависимости от числа n погрешностей в серии и расстояния до навигационной опасности

n	Отношение вероятностей $P(n)/P(25)$ при расстоянии до навигационной опасности				
	$3,0m$	$3,5m$	$4,0m$	$4,5m$	$5,0m$
100	3,6	3,9	4,0	4,0	4,0
500	11,3	19,9	19,7	20,0	20,0
1000	14,3	32,2	38,8	39,9	40,0
∞	15,3	86,4	631,8	5887,2	67109,6

Из анализа формул (2) и (3) и данных, приведенных на рисунке и в таблице, следует, что вероятность P существенно увеличивается с увеличением n , а при $n \rightarrow \infty$ стремится к единице для любого расстояния до навигационной опасности. Таким образом, для того чтобы применять P в качестве критерия НБП, необходимо установить значение n и допустимое значение вероятности P . Этого не сделано в работах [15, 16]. Если не связывать n с числом прохождения корабля мимо навигационной опасности (именно так и делается в работах [7, 12, 13, 15, 16]), то назначение числа n будет носить чисто субъективный характер. Предложение из работ [13, 15, 16] об установлении $n > 25$ допускает беспредельное увеличение числа n . К тому же оно субъективно и не обеспечивает решение поставленной задачи. В связи с изложенным предлагаемая в работах [15, 16] оценка P просто бессмысленна.

Никак не улучшит ситуацию то, что в работах [15, 16] предложено совместно с вероятностью P определять период повторяемости экстремальной погрешности T , который равен $1/P$. К тому же ошибочно утверждается, что период повторяемости обычной (неэкстремальной) погрешности T_n равен произведению Tn . На самом деле в соответствии с работой [8] $T_n = 1/[1-F(z)]$. Тогда, преобразовав отношение T_n/T с учетом формул (2) и (3), получим

$$T_n = T \sum_{k=0}^{n-1} F(z)^k. \quad (4)$$

Очевидно, что произведение Tn не соответствует формуле (4).

5. Рассмотрим, в каких случаях предлагается использовать ДЭР. С помощью нормального закона «в общем случае решается задача оценки вероятности навигационной безопасности плавания. Но в отдельных случаях оценка вероятностей событий, связанных с навигационной безопасностью, может решаться с использованием и других законов распределения погрешностей (например, с помощью закона распределения экстремальных погрешностей)» [14] (выделено нами, *Б. И.*). К этим «отдельным случаям» относятся случаи, «когда требуется в максимальной степени уменьшить риск навигационного происшествия» [15, 16]. Из сказанного можно понять, что оценка вероятности НБП в этих случаях выполняется с использованием ДЭР, а не нормального распределения. Это свидетельствует о субъективном подходе к решению задачи, т.к. для уменьшения риска навигационного происшествия необходимо ужесточать исходные параметры НБП (например, допустимую вероятность НБП), а не заменять математический аппарат, служащий для оценки степени этого риска.

Может быть, имелось в виду, что в этих случаях вероятность НБП будет оцениваться на основе нормального распределения, а *в дополнение* к этой вероятности будет оцениваться «вероятность события, связанного с навигационной безопасностью». Однако и тогда будет иметь место

субъективный подход, связанный с заменой математического аппарата (в общем случае – одно распределение, а в особом случае – два) и использованием необоснованной вероятности.

В то же время отмечается, что при оценке НБП выбор закона распределения (ДЭР, нормального распределения, распределения Лапласа) выполняется по степени «адекватности закона фактическому распределению погрешностей» [15]. Однако ДЭР является распределением наибольшей погрешности, а не обычной (неэкстремальной) погрешности. Наибольшая погрешность является выборкой из серии погрешностей, подчиняющихся, например, нормальному распределению. Тогда выбор между ДЭР и нормальным распределением не может быть выполнен по степени «адекватности», как это ошибочно предлагается в работе [15].

Вызывает сожаление, что ошибочные положения, связанные с дискутируемым вопросом, без надежной апробации помещаются в пособия, предназначенные не только для офицеров, но и для курсантов.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Распределение экстремальных погрешностей может использоваться для оценки вероятности НБП только в гипотетических условиях, не соответствующих реальным условиям плавания.

2. Оценка вероятности появления наибольшего модуля погрешности, превышающего расстояние до навигационной опасности, не характеризует степень НБП.

3. Использование распределения экстремальных погрешностей для оценки степени НБП на практике нецелесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондрашихин В. Т. Определение места судна. – М.: Транспорт, 1981. – 206 с.
2. Кондрашихин В. Т. Распределение погрешностей навигационных измерений // Записки по гидрографии. – 1986. – № 215. – С. 14–21.
3. Сорокин А. И. Теоретические основы гидрографических исследований. – Л.: ГУНиО, 1972. – 196 с.
4. Методики вероятностных расчетов при решении навигационных задач на кораблях и судах ВМФ (МВР-96). – СПб.: ГУНиО МО, 1999. – 218 с.
5. Кондрашихин В. Т. Определение места судна. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
6. Молоканов Г. Ф. Точность и надежность навигации летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1967. – 215 с.
7. Груздев Н. М. Оценка навигационной безопасности плавания с учетом распределения максимальных погрешностей // Записки по гидрографии. – 1997. – № 240. – С. 17–26.
8. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. Пер. с англ. – М.: Мир, 1965. – 450 с.
9. Иванов Б. Е. Использование статистики экстремальных значений в навигации и океанографии // Записки по гидрографии. – 1999. – № 247. – С. 21–29.
10. Иванов Б. Е. Об использовании статистики экстремальных значений при оценке вероятности навигационной безопасности плавания // Записки по гидрографии. – 2002. – № 254. – С. 24–34.
11. Иванов Б. Е. Об оценке вероятности навигационной безопасности плавания при использовании двойного экспоненциального распределения // Навигация и гидрография. – 2002. – № 14. – С. 28–38.
12. Груздев Н. М. О решении проблемы учета максимальных погрешностей в навигации // Записки по гидрографии. – 1999. – № 247. – С. 30–35.

13. Груздев Н. М. Экстремальные погрешности и способ их использования для оценки параметров двойного экспоненциального закона // Записки по гидрографии. – 2001. – № 254. – С. 34–42.
14. Груздев Н. М. Безопасность плавания. Учебник для курсантов военно-морских институтов. – СПб.: СПб ВМИ, 2002. – 211 с.
15. Груздев Н. М. Навигационная безопасность плавания. – СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. – 221 с.
16. Груздев Н. М. Теория навигационных погрешностей. – СПб.: СПбВМИ, 2002. – 325 с.

On the Estimate of the Navigation Safety Degree when Using the Extreme Errors Distribution

В. Е. IVANOV (GNINGI, RF MoD)

The possibility and expediency of using the extreme errors distribution in order to estimate the degree of navigation safety are considered.

ГРНТИ 78.21.41.19

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПО СТВОРАМ

Б. Е. ИВАНОВ
(ГНИНГИ МО РФ)

В статье получены статистические характеристики погрешности определения места по двум створам. Их достоверность подтверждена методом статистического моделирования.

В навигации обычно используется нормальное распределение погрешностей измерения навигационных параметров. При этом изолиния плотности распределения погрешности места представляет собой эллипс, который многие считают объективной и единственно верной характеристикой точности. В то же время в методиках [1] рекомендуется применять распределение Лапласа. Тогда вместо эллипса появляется параллелограмм [2]. При совместном использовании равномерного и нормального распределений, что характерно для определения места по створу и пеленгу (или расстоянию), названная изолиния соответствует двум параллельным отрезкам [3]. Могут быть и другие случаи, когда исчезает эллипс. К этим случаям относится определение места по двум створам, оценка точности которого рассматривается ниже.

Пусть место O определено по ведущему и секущему створам или по двум створам, специально спроектированным для решения конкретной задачи (рис. 1). Боковые уклонения, вычисленные по формулам из инструкции [4], соответственно равны P_1 и P_2 . Оси створов S_1O и S_2O пересекаются под углом Θ . В районе места O створные зоны ограничены отрезками, которые образуют параллелограмм $ABCD$. На точность определения места влияют случайные боковые уклонения Δ_1 и Δ_2 , вследствие которых истинное место будет находиться в точке K на расстоянии Δ от определяемого места O . Это расстояние является модулем погрешности определения места.

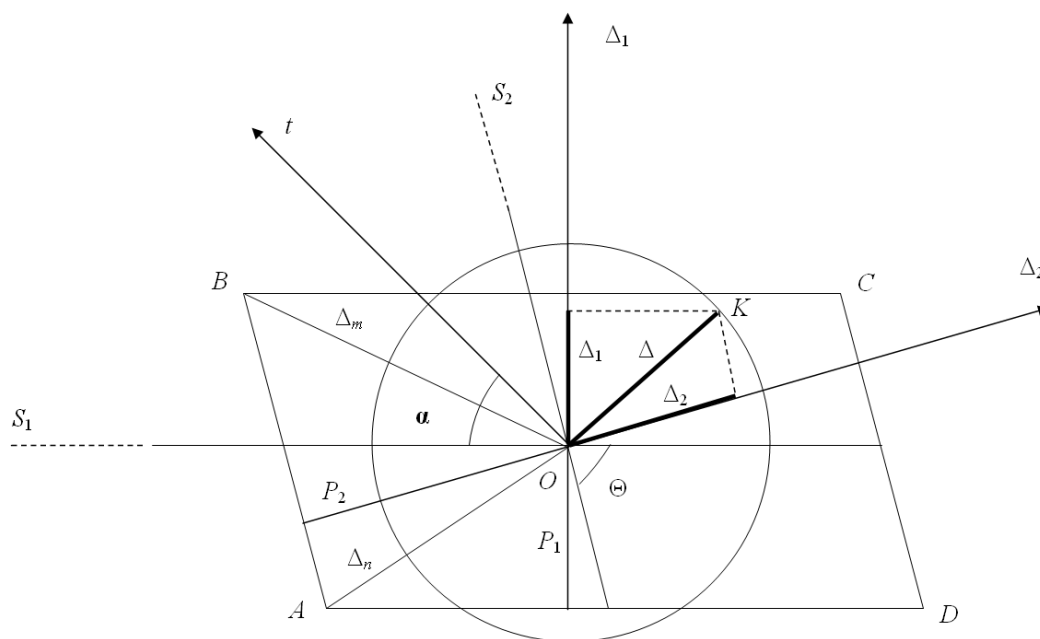


Рис. 1. Определение места O по створам с осями S_1O и S_2O , пересекающимися под углом Θ

Наибольший модуль погрешности Δ_m равен половине длины большей диагонали параллелограмма и в соответствии с рис. 1 выражается зависимостью

$$\Delta_m = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2P_1P_2 \cos \theta}. \quad (1)$$

По формуле (1) выполнены вычисления, результаты которых представлены на рис. 2.

С учетом равномерного распределения величин Δ_1 и Δ_2 и теоремы умножения вероятностей из работы [5] положение точки K в прямоугольных координатах будет характеризоваться плотностью распределения

$$f = \frac{\sin \theta}{4P_1P_2}. \quad (2)$$

Величина f будет постоянна и соответствовать формуле (2) в пределах параллелограмма, а вне его будет равна нулю. Таким образом, в области распространения погрешностей Δ_1 и Δ_2 , соответствующей параллелограмму, не будет изолинии плотности распределения погрешности места.

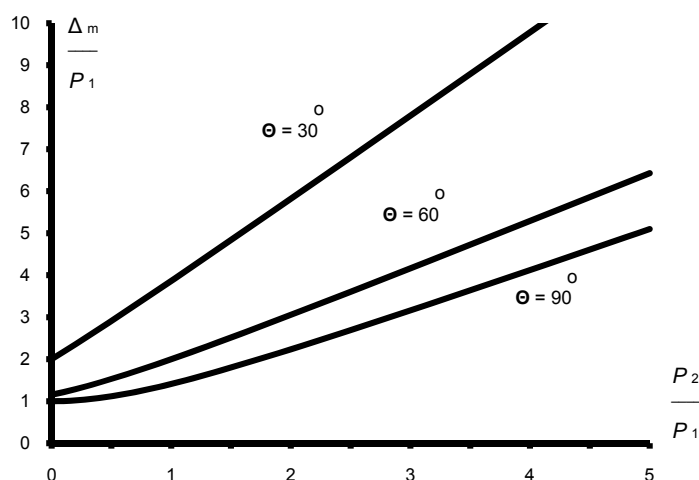


Рис. 2. Изменение наибольшего модуля погрешности Δm в зависимости от боковых уклонов P_1 и P_2 и угла пересечения Θ осей створов

Теперь рассмотрим плотность распределения $\varphi(\Delta)$ модуля погрешности определения места Δ . Для этого на рис. 1 через точку K проведем окружность с центром в точке O и радиусом, равным Δ . В зависимости от величины Δ эта окружность может пересекать или не пересекать стороны параллелограмма. Тогда с учетом постоянства величины f можно написать

$$\varphi(\Delta) = fl, \tag{3}$$

где l – длина той части окружности, которая находится в пределах параллелограмма.

Разобьем параллелограмм на четыре области дугами окружностей с радиусами P_1 , P_2 , Δ_n и Δ_m , где Δ_n – половина длины меньшей диагонали параллелограмма (рис. 1). Величина Δ_n равна

$$\Delta_n = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{P_1^2 + P_2^2 - 2P_1P_2 \cos \theta}.$$

Выполнив громоздкие, но несложные преобразования с элементами параллелограмма и окружности, для всех областей последовательно, начиная с центра, с учетом формулы (3) получим четыре формулы

$$\left. \begin{aligned} \varphi(\Delta) &= 2\pi f \Delta; \\ \varphi(\Delta) &= 2(\pi - 2\arccos \frac{P_1}{\Delta}) f \Delta; \\ \varphi(\Delta) &= 2(\pi - 2\arccos \frac{P_1}{\Delta} - k\arccos \frac{P_2}{\Delta}) f \Delta; \\ \varphi(\Delta) &= 2(\pi - \theta - \arccos \frac{P_1}{\Delta} - \arccos \frac{P_2}{\Delta}) f \Delta, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где k – коэффициент.

Коэффициент в третьей из формул (4) равен

$$k = 1 + \operatorname{sgn}(P_1 - P_2 \cos \theta),$$

где sgn – оператор определения знака числа.

По формулам (4) вычислены значения плотности распределения φ , изменение которых в зависимости от Δ отображено линией на рис. 3 для $\Theta=60^\circ$ и на рис. 4 для $\Theta=90^\circ$ при $P_1=1$ и $P_2=2$. Анализ формул (4) и рис. 3 и 4 показал, что при увеличении Δ от 0 до P_1 плотность распределения φ линейно возрастает, достигает наибольшего значения при $\Delta=P_1$, а затем при последующем увеличении Δ уменьшается и принимает нулевое значение при $\Delta=\Delta_m$. Непрерывность производной плотности распределения нарушается при значениях Δ , равных P_1 , P_2 (только при $k=2$) и Δ_m . Во всех случаях мода модуля погрешности определения места равна P_1 .

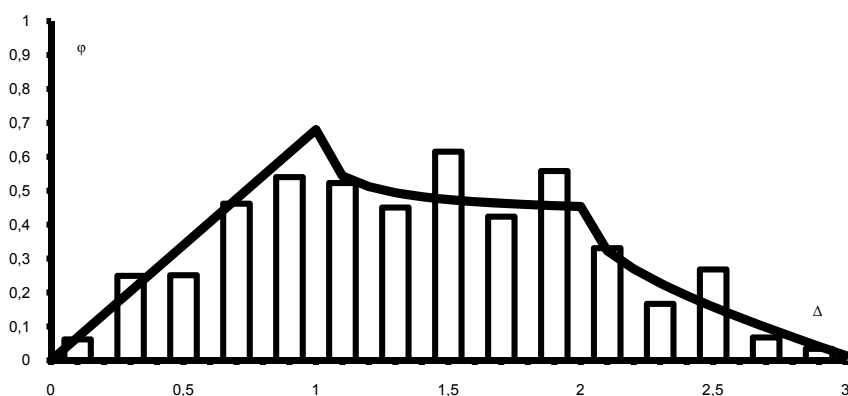


Рис. 3. Изменение плотности распределения φ в зависимости от модуля погрешности Δ при угле пересечения осей створов, равном 60° градусов

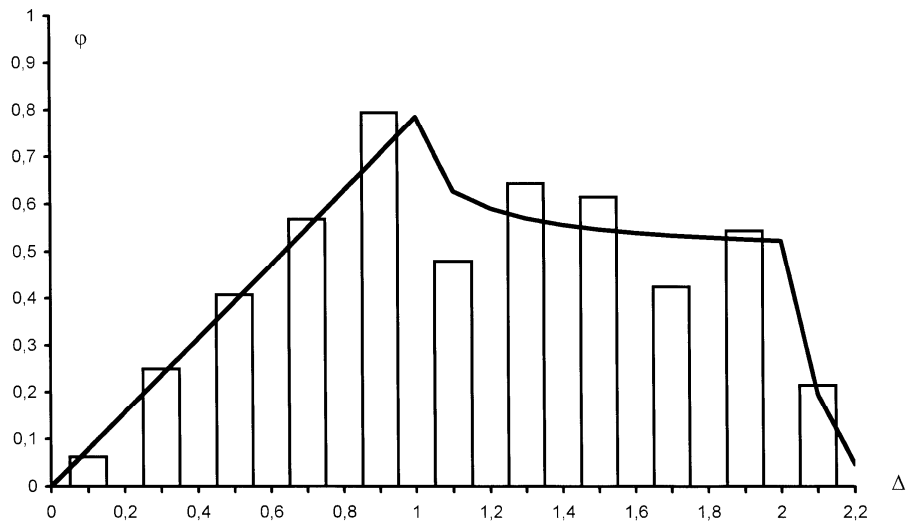


Рис. 4. Изменение плотности распределения ϕ в зависимости от модуля погрешности Δ при угле пересечения осей створов, равном 90° градусам

Рассмотрим функцию распределения $\Phi(\Delta)$ модуля погрешности Δ . Для этого проинтегрируем формулы (4). Тогда получим четыре формулы, область применения которых соответствует области применения формул (4),

$$\left. \begin{aligned}
 \Phi(\Delta) &= f\pi\Delta^2; \\
 \Phi(\Delta) &= f(\pi\Delta^2 - 2\Delta^2 \arccos \frac{P_1}{\Delta} + P_1\sqrt{\Delta^2 - P_1^2}); \\
 \Phi(\Delta) &= f(\pi\Delta^2 - 2\Delta^2 \arccos \frac{P_1}{\Delta} + 2P_1\sqrt{\Delta^2 - P_1^2} - \\
 &\quad - k\Delta^2 \arccos \frac{P_2}{\Delta_n} + kP_2\sqrt{\Delta^2 - P_2^2}); \\
 \Phi(\Delta) &= f[\pi\Delta^2 - \theta(\Delta^2 - \Delta_n^2) - \Delta^2 \arccos \frac{P_1}{\Delta} + P_1\sqrt{\Delta^2 - P_1^2} - \\
 &\quad - \Delta^2 \arccos \frac{P_2}{\Delta} + P_2\sqrt{\Delta^2 - P_2^2} - \Delta_n^2 \arccos \frac{P_1}{\Delta_n} + P_1\sqrt{\Delta_n^2 - P_1^2} - \\
 &\quad - (k-1)\Delta_n^2 \arccos \frac{P_2}{\Delta_n} + (k-1)P_2\sqrt{\Delta_n^2 - P_2^2}].
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Контроль формул (4) и (5) выполнен при $P_1 = P_2 = P$ и $\Theta = 90^\circ$. В этом случае имеем $\Delta_m = \Delta_n = P\sqrt{2}$. Подставляя указанные величины в последнюю из формул (5) и приводя подобные члены, получим точное выражение

$\Phi(\Delta_m)=1$, что отвечает требованию к функции распределения случайной величины из работы [5].

По формулам (5) вычислены значения функции распределения Φ , изменение которых в зависимости от модуля погрешности Δ показано на рис. 5 сплошной линией для $\Theta=60^\circ$ и штриховой линией для $\Theta=90^\circ$ при $P_1=1$ и $P_2=2$.

Рассмотрим среднюю квадратическую погрешность (СКП) M места и СКП M_t по заданному направлению t (рис. 1). В соответствии с работами [3, 6] СКП места равна

$$M = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\frac{1}{3}(P_1^2 + P_2^2)}. \quad (6)$$

По формуле (6) выполнены вычисления, результаты которых представлены в таблице.

Статистические характеристики модуля погрешности определения места

$\frac{P_2}{P_1}$	Θ	$\frac{M}{P_1}$	$\frac{M^*}{P_1}$	$\frac{M^{**}}{P_1}$	$\frac{m^*}{P_1}$	$\frac{m^{**}}{P_1}$	$\frac{Me}{P_1}$
1	30°	1,633	1,633	1,627	1,416	1,415	1,209
	60	0,943	0,943	0,945	0,866	0,866	0,857
	90	0,816	0,817	0,816	0,765	0,766	0,798
2	30	2,582	2,582	2,585	2,244	2,243	2,083
	60	1,491	1,491	1,494	1,349	1,347	1,298
	90	1,291	1,291	1,292	1,186	1,187	1,166
3	30	3,651	3,652	3,646	3,175	3,179	3,055
	60	2,108	2,108	2,108	1,881	1,881	1,828
	90	1,826	1,826	1,825	1,646	1,648	1,610
4	30	4,761	4,761	4,762	4,137	4,130	4,042
	60	2,749	2,749	2,749	2,432	2,435	2,381
	90	2,380	2,381	2,378	2,122	2,123	2,083
5	30	5,888	5,887	5,886	5,113	5,113	5,033
	60	3,399	3,399	3,399	2,991	2,992	2,944
	90	2,944	2,944	2,951	2,605	2,605	2,567

В соответствии с работами [3, 6] СКП по заданному направлению равна

$$M_t = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\frac{1}{3} [P_1^2 \cos^2(\theta - \alpha) + P_2^2 \cos^2 \alpha]}, \quad (7)$$

где α – угол между осью t и осью $S1O$ первого створа.

Контроль формулы (7) выполнен для частного случая, когда $P_1 = P_2 = P$ и $\Theta = 90^\circ$. При этих условиях параллелограмм преобразуется в квадрат. Определяется выражение между длиной отрезка, перпендикулярного оси t и ограниченного сторонами этого квадрата, и расстоянием между отрезком и точкой O . Интегрируя произведение этого выражения на правую часть формулы (2), найдем

$$M_t = P \sqrt{\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

Подставив исходные величины в формулу (7), получим выражение, точно соответствующее равенству (8), что подтверждает правильность формулы (7).

На основании формулы (8) можно сделать вывод, что в данном частном случае СКП по заданному направлению не зависит от выбранного направления. Это является аналогом определения места с использованием эллипса погрешностей, когда его полуоси равны друг другу. Тогда независимость СКП от направления очевидна, т. к. эллипс превратился в окружность, которая имеет центр симметрии бесконечного порядка. В рассматриваемой задаче квадрат не имеет такого центра симметрии, однако отмеченная для окружности особенность сохраняется.

Рассмотрим другие статистические характеристики погрешности определения места. Используя вычисленные по формулам (4) значения плотности распределения φ , методом численного интегрирования по формулам из работы [5] определим СКП места M^* и математическое ожидание m^* модуля погрешности определения места. Используя данные, полученные по формулам (5), определим медиану Me той же погрешности. Найденные величины приведены в таблице.

Контроль математического ожидания выполним для частного случая, когда $P_1 = P_2 = P$ и $\Theta = 90^\circ$. Применяя операцию определения математического ожидания к формулам (4), для этого частного случая получим математическое ожидание m модуля погрешности определения места

$$m = \frac{1}{3} P [\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2})]. \quad (9)$$

Выполнив вычисления по формуле (9), найдем $m=0,765P$, что соответствует табличному значению и свидетельствует о верности математического ожидания, вычисленного методом численного интегрирования.

Достоверность полученных зависимостей проверялась методом статистического моделирования. Для этого на персональном компьютере генерировались 100000 пар случайных боковых уклонений Δ_1 и Δ_2 , подчиняющихся равномерному распределению. Модуль погрешности определения места вычислялся по формуле

$$\Delta = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 - 2\Delta_1\Delta_2 \cos \theta}.$$

В результате статистического моделирования получены статистические ряды модуля погрешности определения места, на основании которых на рис. 3 и 4 построены гистограммы, а на рис. 5 ромбиками отмечены дискретные значения функции распределения модуля погрешности определения места. Кроме того, этим методом определены значения СКП места M^{**} и математического ожидания m^{**} величины Δ , которые приведены в таблице. Из таблицы и рис. 3–5 видно, что гистограмма и дискретные значения достаточно точно отражают плотность и функцию распределения модуля погрешности определения места, а три значения СКП места и два значения математического ожидания модуля погрешности определения места соответственно достаточно близки друг к другу. Сказанное подтверждает достоверность полученных зависимостей.

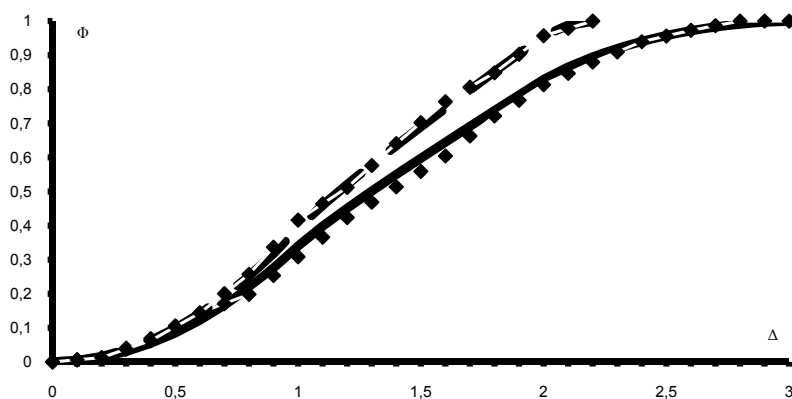


Рис. 5. Изменение функции распределения Φ в зависимости от модуля погрешности Δ при угле пересечения осей створов, равном 60 (сплошная линия) и 90 градусов (штриховая линия)

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что при определении места по двум створам, когда используется равномерное распределение погрешностей, вообще отсутствует изолиния плотности распределения погрешности места, а зависимости для СКП места и СКП по заданному направлению находятся по процедуре, обычно применяемой в навигации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методики вероятностных расчетов при решении навигационных задач на кораблях и судах ВМФ (МВР-96). – СПб.: ГУНиО МО, 1999. – 218 с.
2. Иванов Б. Е. Оценка точности определения места при использовании распределения Лапласа // Навигация и гидрография. – 1996. – № 2. – С. 66–72.
3. Иванов Б. Е. Об оценке точности определения места при использовании навигационного створа // Записки по гидрографии. – 2000. – № 251. – С. 27–33.
4. Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО – 2000). – СПб.: ГУНиО МО РФ, 2001. – 327 с.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
6. Кондрашихин В. Т. Определение места судна. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1989. – 230 с.

Evaluation of the Accuracy of Fixing the Position by Navigational Ranges

B. E. IVANOV (GNINGI, RF MoD)

Statistical characteristics for position fixing error by two navigational ranges are obtained. Their validity is confirmed by the method of statistical modeling.

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

ГРНТИ 67.21.23

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОРСКОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКУЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ УРОВНЯ МОРЯ

С. П. БАРИНОВ (ГНИНГИ МО РФ),
А. С. БАРИНОВ (30 гидрографический отряд
Гидрографической службы Северного флота)

Дан анализ информационного потенциала, заложенного в формат сигнала станций Морской дифференциальной подсистемы (МДПС). Показаны существующие возможности комплексного подхода к решению задач НГО на примере передачи в формате сигнала МДПС данных с уровенных постов.

Наиболее перспективным средством обеспечения безопасности мореплавания в прибрежных водах и при промышленном освоении морского шельфа являются дифференциальные станции глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В отдельных случаях только эти средства навигации реализуют необходимую точность определения места при проведении гидрографических работ и иных морских инженерных изысканий. В соответствии с планами развития отечественных дифференциальных станций на базе морских радиомаяков, расположенных на побережье России, должно быть развернуто более 30 контрольно-корректирующих станций (ККС), объединенных в Морскую дифференциальную подсистему (МДПС) [1]. Стационарные станции этого класса способны передавать поправки на дальности до 300 км в выделенном диапазоне частот 283,5–15,0 кГц. Мобильные дифференциальные станции ГНСС создаются для оперативного НГО сил флота и высокоточного координирования гидрографических исследований на дальностях до 100 км. Скорость передачи корректирующей информации устанавливается в зависимости от объема данных, требуемого времени их обновления и может составлять от 25 до 200 бод. Прием поправок на кораблях и судах осуществляется с помощью приемников корректирующей информации, имеющих интерфейс RS 232 для сопряжения с навигационной аппаратурой потребителей (НАП) ГНСС или персональным компьютером.

Содержание и форматы кадров сообщений для передачи корректирующей информации станциями МДПС стандартизованы [2]. Передаваемые данные разделены на кадры, которые различаются по типу. Кадр каждого типа имеет индивидуальный (один из 64) идентификатор. Назначение и структура кадров 1–22, 31–37 и 59 типов определены в их окончательной форме, основные из них представлены в табл. 1. Структура

остальных кадров не установлена. Сообщения кадров 60–63 зарезервированы для использования в многоцелевых линиях передачи данных, например, для передачи дифференциальных поправок радионавигационных систем Logan-C и «Чайка», других навигационных сообщений и гидрометеорологической информации.

Таблица 1

Основные сообщения

Тип кадра GPS	Наименование	Тип кадра ГЛОНАСС
1	Дифференциальные поправки	31
3	Параметры ККС	32
5	Исправность космического аппарата	33
6	Нуль-кадр	34 ($N=0$ или 1)
7	Альманах ККС	35
9	Дифференциальные поправки (взамен 1 или 31 типа)	34($N>1$)
16	Специальное сообщение	36

Каждый кадр передается в виде потока цифровой информации, которая разделена на строки по 30 бит. Последние 6 бит каждой строки являются проверочными битами на четность. Первые две строки (заголовок) каждого кадра содержат данные, которые являются общими для кадров всех типов. Их содержание и формат представлены в табл. 2.

Таблица 2

Содержание первой и второй строки кадра

Строка	Состав	Количество бит	Масштабный коэффициент и единицы измерения	Диапазон
Первая	Преамбула	8	-	-
	Идентификатор (тип) кадра	6	1	-1–64*
	Индекс опорной станции	10	1	0–1023
	Четность	6	-	
Вторая	Модифицированный Z-счет	13	0,6 сек	0–3599,4с
	Номер последовательности	3	1	0–7
	Число строк с данными (N)	5	1 строка	0–31 строк
	Состояние опорной станции	3	-	8 состояний
	Четность	6	-	

Примечание: * – 64 обозначается нулями во всех разрядах.

Сообщения передаются с различной периодичностью в зависимости от типа кадра (табл. 3).

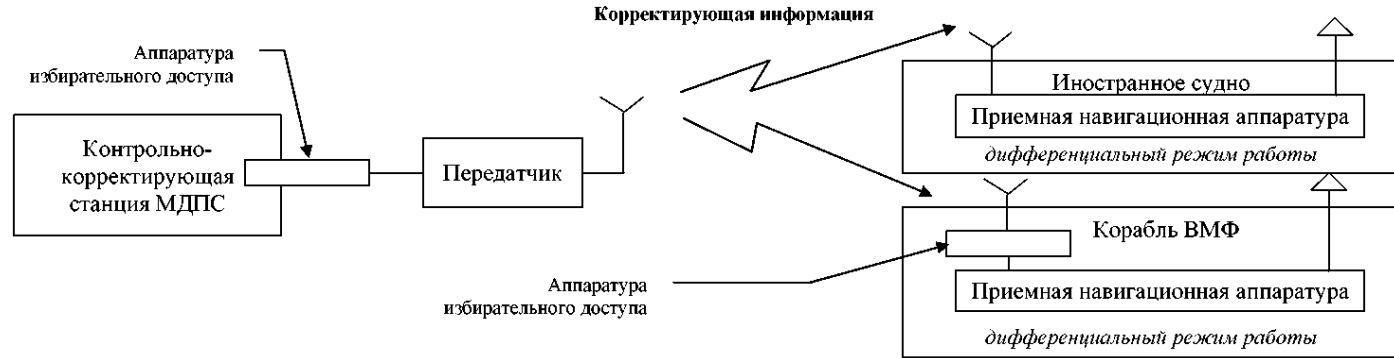
Период передачи сообщений

Тип	Период
9(1)	Минимальный, но не более 15–20 с
3	Дважды в час, на 15-й и 45й минуте
5	Передается на 5, 20, 35, 50-ю минуту каждого часа
6	Передается при мере необходимости
7	Передается на 7, 22,37,52-ю минуту каждого часа
16	Передается при необходимости
34/(31)	Минимальный, но не более 50–60 с
32	Передается на 16-ю и 46-ю минуту каждого часа
33	Передается на 6, 21, 36, 51-ю минуту каждого часа
34	Передается при необходимости
35	Передается на 8, 23, 38, 53-ю минуту каждого часа
36	Передается по мере необходимости

Для предотвращения использования корректирующей информации враждебными элементами с целями, создающими угрозу национальной безопасности России, в состав оборудования станций МДПС и НАП ГНСС введена аппаратура избирательного доступа (АИД). Ее наличие позволяет дистанционно, по команде со станции, осуществлять перевод аппаратуры легитимных потребителей в режим избирательного доступа и (или) в общедоступный режим (рис. 1). При введении режима избирательного доступа предусмотрено доведение закрытой корректирующей информации до трех категорий потребителей МДПС различного иерархического уровня с возможностью исключения из обслуживания потребителей более низких уровней.

Для дистанционного управления дифференциальными станциями с удаленных пунктов контроля в состав оборудования МДПС вводятся средства радиорелейной связи. Например, связь между объектами МДПС Баренцева моря будет поддерживаться радиорелейной линией, имеющей три плеча (в соответствии с конфигурацией Кольского залива). Релейные станции, имея общую пропускную способность 384 кбит/с, позволяют обеспечивать двухстороннюю цифровую и телефонную связь как объектов МДПС, так и промежуточных пунктов, на которых они расположены.

А. Мирное время



Б. Угрожаемый период

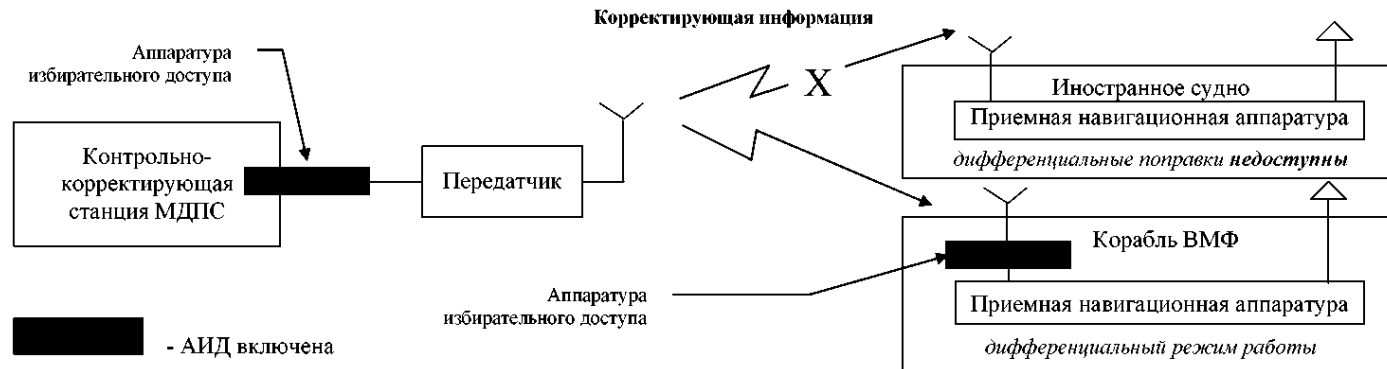


Рис. 1. Условная схема реализации избирательного доступа в МДПС

Обобщая вышеизложенное, можно сформулировать следующие свойства МДПС, характерные для телекоммуникационных систем:

1. Массовость обслуживания – способность обеспечивать информацией неограниченное число потребителей, находящихся в зоне ее действия.

2. Оперативность – способность передавать информацию потребителям в близком к реальному масштабе времени.

3. Избыточность информационных ресурсов – способность, функционируя по прямому назначению, выполнять дополнительный трафик (нести дополнительную информационную нагрузку).

4. Избирательность доступа к информации – способность при необходимости, ограничивать круг потребителей информации заранее определенными категориями пользователей.

5. Стандартизованность «входных-выходных» параметров системы – универсальность инженерно-технических и аппаратно-программных решений в выборе интерфейсов с сопрягаемыми средствами.

6. Приоритетность и легитимность используемого диапазона частот – функционирование в выделенном диапазоне частот на первичной основе.

7. Многоуровненность и распределенность управления – свойства, достигаемые соответствующей организационно-штатной структурой Службы МДПС, имеющей центральное, региональные и периферийные подразделения.

8. Доступность информационного сигнала – свойство, обеспечиваемое малым затуханием при распространении радиоволн и их способностью огибать крупные элементы рельефа местности.

9. Достоверность передаваемой информации – свойство, достигаемое применением специальных корректирующих кодов.

Таким образом, приведенные выше телекоммуникационные свойства МДПС позволяют рассматривать ее как навигационно-информационную систему. Известно, что наличие резервных и дублирующих средств связи существенно повышает надежность управления подчиненными частями и подразделениями. Кроме того, комплексное использование оборудования МДПС в решении ряда задач НГО флота может значительно повысить эффективность их выполнения за счет сокращения численности привлекаемых средств и обслуживающего персонала. Покажем возможность реализации комплексного подхода в использовании МДПС на примере передачи в составе корректирующей информации данных с уровней постов.

Успешное выполнение проводки кораблей, стесненных своей осадкой, и крупнотоннажных объектов при малом запасе воды под килем возможно при условии точного знания их положения относительно навигационных опасностей и значений уровня моря в каждый момент времени. При проведении гидрографических исследований, наряду с данными об измеренных глубинах и их координатах, важно также иметь информацию о

колебаниях уровня моря, которая формируется на уровне постах, заблаговременно развернутых в районе работ. Современные средства навигации и гидрографии (электронные картографические системы, автоматизированные гидрографические комплексы, НАП ГНСС, мареографы) позволяют с требуемой точностью получать необходимые данные и обрабатывать их в реальном масштабе времени. Парадокс заключается в том, что между двумя автоматически действующими средствами (мареографом и, например, гидрографическим комплексом) передаточным звеном остается человек, который голосом по радиосвязи или с дискетой в руке должен доставлять необходимые данные. Т. е. отсутствие выделенного цифрового канала связи, реализующего передачу информации обеспечиваемым кораблям и судам от мареографа на расстояния, соизмеримые с радиусом действия уровня поста, не дает возможность полностью автоматизировать в море весь процесс обработки данных. В отдельных случаях для этого можно использовать стандартные средства цифровой связи. Например, при проведении морских инженерных изысканий в Финском заливе в интересах строительства Северо-Европейского газопровода данные о колебаниях уровня моря с уровненых постов передавались на гидрографические суда с использованием абонентских терминалов спутниковых систем связи «Глобалстар» и «Инмарсат». Однако в повседневной деятельности гидрографических подразделений ВМФ по выполнению съемки рельефа дна применение коммерческих связных систем недопустимо.

Следует отметить, что в настоящее время существует ряд объективных причин, ограничивающих возможности создания и внедрения специализированных радиотехнических средств передачи данных с уровненых постов. К ним можно отнести имеющиеся лимиты по финансированию НИОКР в Минобороны РФ, загруженность радиочастотного спектра и связанные с этим сложности по выделению рабочих частот, финансовые ограничения на содержание персонала, необходимого для обслуживания технических средств. Эти факторы вынуждают искать решение рассматриваемой задачи на базе эксплуатируемых в ГС ВМФ и разрабатываемых в ее интересах радиотехнических средств навигационного оборудования.

Анализ документов [3–6] и опыт эксплуатации радиотехнических систем ВМФ позволяют сформулировать следующие минимальные требования к средствам передачи данных о колебаниях уровня моря:

- дальность действия – 50–100 км;
- дискретность передачи – 10–15 мин.;
- объем передаваемой информации – не более 24 байт;
- интерфейс – USB (RS-485 или RS-232);
- наличие выделенной на первичной основе рабочей частоты.

Сопоставимый анализ технических характеристик оборудования МДПС с приведенными выше требованиями показывает, что трансляция данных о колебаниях уровня моря может быть организована в формате передачи корректирующей информации дифференциальной станцией ГНСС при ее сопряжении с мареографом. В этом случае кадр «данных о колебаниях уровня моря» (допустим, 60-го типа) будет сформирован в следующем виде (рис. 2).



Рис. 2. Формат кадров 60-го типа

К достоинствам совместного использования оборудования МДПС и мареографа следует отнести:

- оперативность доведения информации;
- возможность корректно и с высокой достоверностью оценить качество съемки рельефа дна непосредственно в море, т. к. глубины на основных и контрольных галсах будут исправлены поправками за колебания уровня моря, полученными на основе реальных измерений (а не предвычисленными);
- обеспечение неограниченного количества потребителей, в том числе, выполняющих проводку судов, стесненных своей осадкой и крупнотоннажных объектов при малом запасе воды под килем;
- сокращение материальных и финансовых расходов, т. к. устраняется необходимость привлечения дополнительного персонала по обслуживанию мареографа и обеспечения его жизнедеятельности на уровне поста;
- комплексное решение вопросов энергообеспечения и охраны оборудования дифференциальной станции и мареографа.

Представляется, что приведенный пример не исчерпывает все возможности использования телекоммуникационных свойств МДПС при

решении задач НГО флота. В то же время следует понимать, что интеграция дифференциальных станций ГНСС с другими техническими средствами потребует выполнения определенных работ по их сопряжению, а также оптимизации совместного размещения этих средств на российском побережье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордиенко А. И., Баринов С. П. Перспективы создания морской дифференциальной системы в Российской Федерации // Записки по гидрографии. – 2003. – № 257. – С. 71–75.
2. Стандарт отрасли. Формат передачи дифференциальных поправок по системам ГЛОНАСС/GPS (ОСТ 31.6.60-01). М.: Минтранс, 2001. – 59 с.
3. Правила гидрографической службы № 35. – Л.: УНГС ВМФ, 1956. – 193 с.
4. Правила гидрографической службы № 4. Съемка рельефа дна. Часть 2. Требования и методы (ПГС № 4. Ч.2). – Л.: ГУНиО МО, 1984. – 264 с.
5. Автоматизированный мареограф АМП-20. Руководство по эксплуатации. ТТ1.834.000 РЭ.
6. Измерители гидрологические ГМУ-2. Уровнемер ГМУ-2М. Руководство по эксплуатации. ИЛАН.416211.005 РЭ.

Possibilities of Employment of Marine GNSS Equipment to Determine the Running Value of the Water Level

S. P. BARINOV (GNINGI, RF MoD),
A. S. BARINOV (Hydrographic Service of the North Fleet).

The information potential in the format of the signal of the Marine GNSS stations is analysed. The available possibilities of the complex approach to solving the problems of Navigational-Hydrographic Support, using as an example the data transmission from the water level stations in the Marine GNSS signal format, are shown.

ГРНТИ 78.21.43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕКУЩИХ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ВОЛНОМЕРНОГО БУЯ ПО СПУТНИКОВЫМ НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ

В. Н. БЫСТРОВ,
Б. И. ЛОБОЙКО,
Г. И. ИЛЬЮЩЕНКО (ГНИНГИ МО РФ)

Приведены и проанализированы алгоритмы определения координат и линейной скорости волномерного буя с помощью спутниковых навигационных систем.

Основной задачей океанологии является изучение взаимодействия ветра, волн, течений и их связи с перемещениями воздушных масс. Информация о волнении дает возможность прогнозирования воздействия водно-воздушной среды на поведение объектов, работающих в море, влияния волн на размыв берегов, прогнозирование погоды. Прогнозы погоды, базирующиеся на анализе измеренных океанографических параметров, используются в авиации,

морском флоте, строительстве, сельском хозяйстве и других отраслях. Решение этих задач возможно путем измерения волнения в очень широком спектре частот и большом диапазоне амплитуд. При этом наибольшую ценность представляют синхронные наблюдения процессов. Под такими наблюдениями понимаются измерения, которые производятся одновременно в нескольких точках, разнесенных либо по площади, либо по глубине. Если измерения осуществляются одновременно с разнесением измерителей как по площади, так и по глубине, то наблюдения имеют объемный характер, при которых получают самую ценную информацию об изменчивости океана. К квазисинхронным наблюдениям относятся такие, при которых, несмотря на разницу во времени или в пространстве, изменчивость изучаемых полей принимается неизменной на интервале этой разницы.

Для получения гидрометеорологической и аэрологической информации от внешних источников на научно-исследовательских судах (НИС) используется комплекс гидрометеорологического обеспечения «Сюжет-КМ», для измерения и регистрации параметров вертикального профиля температуры, относительной электрической проводимости и гидростатического давления до глубины 2000 м, расчета солёности, плотности, скорости распространения звука в воде используется гидрологический зонд ОЛД-1.

В 70-ые годы XX в. была предпринята попытка глобального океанского мониторинга с помощью тяжелых якорных буев, оснащенных датчиками измерения метеорологических и океанографических параметров. Информация на береговые центры передавалась по кабельным и УКВ радиолиниям, а впоследствии через спутниковые каналы связи. Однако построенная таким образом наблюдательная сеть оказалась несостоятельной как по финансовым, так и по техническим причинам. Стало очевидным, что развитие глобальной наблюдательной сети возможно только при использовании спутниковой связи. Именно с якорных буев, оснащенных аппаратурой связи через ИСЗ, начала развиваться спутниковая технология «Data Platform» или платформ сбора данных. Утвердившийся термин «платформа» подразумевает автономный измерительный комплекс, оснащенный спутниковой связью и способный автоматически работать в течение длительного времени. Это может быть морской буй, наземная метеостанция, пост экологического контроля, аэростатный маркер, или прибор для изучения диких животных в естественной среде обитания.

Количественное и качественное изменение в области использования измерительных платформ со спутниковой связью произошло с появлением доплеровских систем связи «КОСПАС/SARSAT», «ARGOS» и «КУРС». Основное достоинство этих систем состоит в том, что при установке на платформе единственного передатчика одновременно решаются две задачи – передачи данных и определения координат платформы.

Именно с появлением системы «ARGOS» стала интенсивно развиваться спутниковая дрейфтерная технология, в которой используются платформы, свободно перемещающиеся в воде или воздухе.

В области исследования мезомасштабной и более крупной изменчивости в океане и атмосфере в настоящее время нет других контактных методов, по эффективности и результативности сопоставимых со спутниковой дрейфтерной технологией.

Судовые исследования осуществляются в основном одним кораблем, иногда группой, работающей в рамках совместной программы. Однако групповые исследования очень дороги, что делает их практически непригодными для установления мониторинга океанографических полей. Таким образом, сфера применения судовых исследований ограничивается в основном квазисинхронными наблюдениями, проводимыми путем полигонных съемок с помощью зондирующих измерительных комплексов с борта судна. Возможно обеспечение синхронных наблюдений по глубине, например, посредством гирлянд температурных датчиков.

Аэрокосмические средства позволяют оперативно осветить гидрометеорологическую и океанографическую обстановку на обширных акваториях океанов и морей. Ввиду кратковременности пролетов наблюдения за один виток можно считать синхронными, а между двумя смежными – квазисинхронными. Однако область применения аэрокосмических средств пока ограничена поверхностным слоем воды. В то же время дистанционные методы обладают уникальными возможностями, например, при измерении уровня океана.

В сравнении с другими исследования с помощью якорных буйев являются наиболее информативными. Именно поэтому развитию глобальной наблюдательной сети за состоянием океана с помощью якорных буйев было уделено такое большое внимание в конце 60-х годов XX в. В различных странах, особенно в США, разрабатывались, изготавливались и испытывались тяжелые, водоизмещением до 100 т, буи оснащенные различными датчиками.

Однако и это направление не стало развиваться далее, так как неоспоримые преимущества принадлежат свободно дрейфующим буйковым системам, оснащенным измерительной аппаратурой. В основу системы должно быть заложено требование унификации – одновременно создается как аппаратура сбора информации, так и аппаратура контроля качества измеряемых параметров.

Начало наиболее интенсивного развития новых направлений при исследовании Мирового океана и приподной атмосферы можно отнести к концу 60-х годов XX в. Именно в это время была предпринята первая попытка охвата их систематическими наблюдениями с помощью разветвленной сети якорных буйковых станций, а в промышленно развитых странах создавались различные конструкции буйев, оснащенных измерителями океанографических и гидрометеорологических параметров.

При создании океанографических приборов широкое распространение получило комплексирование различных измерительных средств, это привело к тому, что создаваемые автономные буи стали предназначаться не только для измерения волнения, но и получения информации о температуре воды и воздуха, скорости и направлении течений, а также других физических величин.

Форма проектируемых буюв должна учитывать требования, предъявляемые к бую со стороны средств измерения этих величин. Поэтому некоторые фирмы выпускают буи, имеющие не только цилиндрическую, но и иную форму.

За рубежом для измерения морского волнения используются различные радиобуи с неакустическими датчиками. Основными их производителями являются США и Канада. В Канаде для измерения волнения разработана серия компактных, сбрасываемых с летательных аппаратов или с надводных кораблей, дрейфующих радиобуюв генерации CMOD (Compact Meteorological and Oceanographic Drifter).

Так, CMOD/Waves – одноразовый дрейфующий буй предназначен для измерения и расчета характеристик поверхностного волнения и передачи данных через интегрированную систему MAT 609 Argos PTT и спутниковую систему NOAA Tiros. Дополнительно к стандартным датчикам генерации CMOD в бую используются акселерометры, датчики угла наклона и компасное устройство для определения направления волнового фронта.

Внедрение спутниковой (навигационной) технологии, комплектация волномерных буюв спутниковыми навигационными приемниками значительно сокращает время определения координат бую и позволяет с высокой точностью определять его элементы движения.

Следует иметь ввиду, что понятие «спутниковые навигационные технологии» означает методы и приемы (алгоритмы) использования результатов измерений радионавигационных параметров (РНП) сигналов спутниковых навигационных систем (СНС), полученных с точностью как обычных, так и специальных спутниковых навигационных приемников (СНП) для решения различных прикладных задач. В зависимости от требуемой точности навигационного обеспечения их можно разделить на три группы:

- задачи, обеспечиваемые штатным навигационным режимом СНС;
- задачи, обеспечиваемые дифференциальным режимом СНС;
- задачи, требующие относительного позиционирования.

Штатный навигационный режим предполагает использование измерительной информации только от СНС. Из кодовых измерений (псевдодальностей) обычно формируют оценки координат объекта с автоматическим исключением систематической ошибки измерений (расхождение системной шкалы времени и шкалы СНП). Данная ошибка является проявлением специфики бззапросного метода спутниковой навигации (псевдодальномерный метод) и исключается оцениванием ее в

расширенном векторе координат. Одним из простейших алгоритмов решения задачи абсолютного позиционирования является способ наименьших квадратов [1]:

$$\Delta X = (H^T H)^{-1} H^T L, \quad (1)$$

где ΔX – вектор поправок к счислимым координатам, т. е. к координатам точки, относительно которой произведена линеаризация уравнений измерений;

L – вектор разностей измеряемых и счислимых значений навигационных параметров;

H – матрица частных производных псевдодальностей по оцениваемым параметрам

$$H = \|h_{ji}\|$$

(здесь индекс i соотносит переменные с оцениваемыми параметрами, j – с номерами спутников).

Заметим, что элементы матрицы h_{ji} ($i = 1, 2, 3$) представляют собой направляющие косинусы линии визирования спутников, а $h_{j4} = 1$.

Решение навигационной задачи по формуле (1) реализует декомпозицию полного вектора состояния (координаты и скорости) на координатный и скоростной подвекторы и полного вектора измерений (псевдодальности и псевдоскорости) также на два подвектора: кодовый и фазовый. Следовательно, из псевдодоплеровских измерений получаются оценки проекций вектора скорости. Систематической ошибкой здесь выступает скорость изменения расхождения шкал времени, вызванная главным образом нестабильностью опорного генератора спутникового навигационного приемника. Матрица $\|h_{ji}\|$ при этом изменений не претерпевает.

Дифференциальный режим в СНП предполагает формирование в наземной контрольно-корректирующей станции (ККС), координаты которой геодезически с высокой точностью привязаны к местности, поправок к измеренным значениям дальностей, вызванных ошибками прогноза эфемеридной информации (ЭИ), задержками в тропосфере и ионосфере (для одночастотного СНП), передачу их потребителям, находящимся в зоне функционирования ККС в радиусе до нескольких десятков – сотен километров, и учет этих поправок в СНП при решении навигационной задачи.

Тем не менее оба этих режима ни функционально, ни по уровню точности непригодны для решения задачи определения параметров движения волномерного буя с требуемой точностью, а также решения задач определения наклонов морской поверхности.

Вопросы движения морского объекта в условиях качки излагаются в многочисленных работах по теории корабля. Основополагающим считается доклад академика А. Н. Крылова об общей теории качки корабля на волнении, прочитанный им в 1898 г. в Английском обществе корабельных инженеров.

Определение текущей скорости волномерного буйа по сигналам СНС представляет собой довольно сложную задачу, особенность которой заключается в том, что по сигналам СНС удастся измерить координаты точки буйа, совмещенной с фазовым центром антенны (ФЦА) спутниковой навигационной аппаратуры, установленной на буйе. Эта точка участвует в сложном поступательном и вращательном движении.

Задача определения параметров движения буйа может быть представлена следующим образом. Пусть волномерный буй (см. рисунок) с центром качаний M , произвольно заданной точкой N и фиксированной точкой A , совмещенной с ФЦА, участвует в поступательном движении с линейной скоростью \overline{V} и вращается вокруг мгновенного центра качаний с угловой скоростью ω_k . Линейная скорость точек A и N в условиях сложного движения обозначена векторами \overline{V}_A и \overline{V}_N . Положение точек A , N и M относительно центра Земли обозначено векторами \overline{R}_A , \overline{R}_M и \overline{R}_N . Точки A и N фиксированы относительно корпуса буйа, а положение точки M в процессе динамического движения непрерывно меняется. Векторы \overline{R}_A и \overline{V}_A определяются координатами и составляющими скорости точки A , вырабатываемыми СНП. Пренебрегая в данном случае нежесткостью несущих конструкций антенного устройства и корпуса самого волномерного буйа, на основании известного выражения для вектора скорости точки твердого тела при сложном движении, следуя работе [2] запишем:

$$\overline{V}_A = \overline{V}_M + \overline{\omega}_k \cdot \overline{r}_A; \quad \overline{V}_N = \overline{V}_M + \overline{\omega}_k \cdot \overline{r}_N. \quad (2)$$

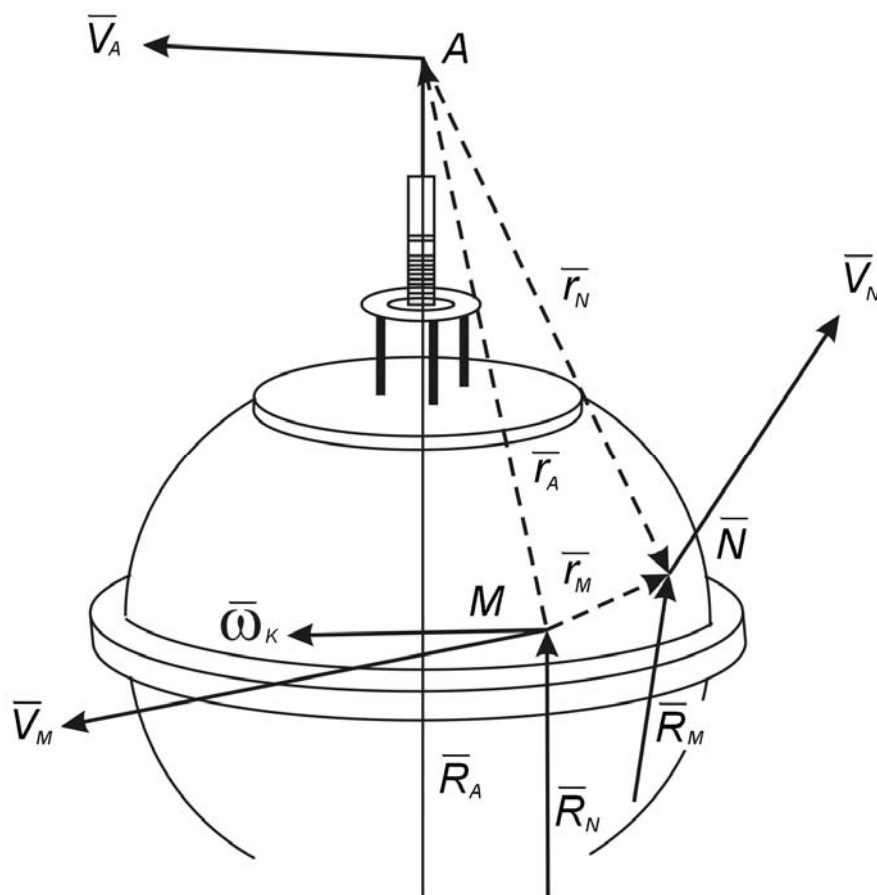
Скорость точки M , положение которой неопределенно меняется, можно выразить в виде разностей:

$$\overline{V}_M = \overline{V}_A - \overline{\omega}_k \cdot \overline{r}_A; \quad \overline{V}_M = \overline{V}_N - \overline{\omega}_k \cdot \overline{r}_N. \quad (3)$$

Из данного выражения получим значение для вектора скорости заданной точки буйа:

$$\overline{V}_N = \overline{V}_A + \overline{\omega}_k (\overline{r}_N - \overline{r}_A) = \overline{V}_A + \overline{\omega}_k \cdot \overline{r}_N. \quad (4)$$

Поскольку выражения (3) и (4) свободны от параметров движения и положения мгновенного центра качаний M , они могут быть использованы для пересчета измеренной по сигналам СНС информации в заданную точку.



К определению параметров движения заданной точки буя (пояснения в тексте)

Из выражения (2) следует, что для определения вектора скорости заданной точки волномерного буя по данным СНС дополнительно к \vec{V}_A необходимо знать относительное положение заданной точки и антенны (\vec{r}), а также угловую скорость вращения корпуса буя ($\vec{\omega}_K$).

Для решения данного вопроса, опишем положение точки M через A и N :

$$\vec{R}_M = \vec{R}_A - \vec{r}_A; \vec{R}_M = \vec{R}_N - \vec{r}_N. \quad (5)$$

Из формулы (5) получим выражение, определяющее положение заданной точки волномерного буя:

$$\bar{R}_N = \bar{R}_A - \bar{r}_A + \bar{r}_N = \bar{R}_A - \bar{r}. \quad (6)$$

Поскольку выражения (2) и (3) свободны от параметров движения и положения мгновенного центра качаний M , они могут быть использованы для пересчета измеренной по сигналам СНС информации в заданную точку.

Представив выражения (2) и (3) в проекциях на оси топоцентрической системы координат с началом в точке A , получим:

$$\left. \begin{aligned} V_{NX} &= V_{AX} + \omega_{ky} \cdot r_x - \omega_{kx} \cdot r_y; & R_{NX} &= R_{AX} - r_x = -r_x; \\ V_{Ny} &= V_{Ay} + \omega_{kx} \cdot r_x - \omega_{ky} \cdot r_y; & R_{Ny} &= R_{Ay} - r_y = -r_y; \\ V_{NX} &= V_{AX} + \omega_{kx} \cdot r_y - \omega_{ky} \cdot r_x; & R_{NX} &= R_{AX} - r_x. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Методика расчета параметров движения морского объекта в условиях нерегулярной качки детально разработана в работах [2, 3] и позволяет вычислить статистические характеристики погрешностей навигационных определений по сигналам СНС.

Чтобы исключить влияние отстояния точек A и N на точность определения составляющих вектора скорости перемещения заданной точки волномерного буя, в общем случае необходимо учитывать соответствующие члены в правых частях уравнений (4). В нашем конкретном случае в связи с малыми размерениями буя этими величинами можно пренебречь. Различные способы и алгоритмы решения аналогичной задачи изложены в работах [4, 5].

Модель динамики волномерного буя должна отражать закон изменения во времени его вектора состояния. Конкретный вид модели зависит от выбора опорной системы координат, от размеров и формы волномерного буя, статистических характеристик действующих на него случайных возмущений. Все это вынуждает в общем случае относить ансамбль траекторий к категории случайных функций времени. Для полного статистического описания ансамбля траекторий требуется задать его закон распределения, для чего необходимо располагать обширной статистикой. В данном случае в процессе синтеза алгоритма оптимальной обработки информации необходимо задаваться гипотезами о статистических характеристиках волномерного буя.

Учитывая малые размерения волномерного буя и равные соотношения величины антенны, определение координат места и составляющих скорости его движения наиболее целесообразно проводить по квазидальномерным или квазидоплеровским измерениям. Использование одновременных измерений дальности и радиальной скорости позволяет по такой выборке определить не только координаты, но и составляющие скорости движения волномерного буя. Для нахождения всех неизвестных параметров нет необходимости решать систему уравнений, так как используя метод декомпозиции при определенных условиях, можно упростить задачу и перейти к независимому решению двух уравнений, дающих, соответственно, координаты и составляющие вектора

скорости буя. Условием применения декомпозиции является отсутствие откликов измеряемых величин на изменения некоторых из определяемых параметров. Известно, что при одномоментных измерениях составляющие скорости определяются только по доплеровским измерениям. В то же время для орбит навигационных спутников системы ГЛОНАСС можно считать, что доплеровские измерения слабо откликаются на изменения координат, вследствие чего координаты определяются практически только по квазидальномерным измерениям. Следовательно, без потери точности обработку дальномерно-доплеровских измерений можно производить в два этапа. На первом этапе по результатам квазидальномерных (разностно-дальномерных) измерений проводится оценка координат волномерного буя, а на втором – по результатам квазидоплеровских (разностно-доплеровских) измерений оцениваются составляющие скорости его движения. На первом этапе могут использоваться приведенные в работе [2] дальномерный, разностно-дальномерный и квазидальномерный алгоритмы.

На втором этапе оценка составляющих скорости волномерного буя сводится к решению уравнений:

- при доплеровских измерениях

$$r_i = r_i^{-1} [(x_{ci} - x) \cdot (\dot{x}_{ci} - \dot{x}) + (y_{ci} - y) \cdot (\dot{y}_{ci} - \dot{y}) + (z_{ci} - z) \cdot (\dot{z}_{ci} - \dot{z})], \quad (8)$$

$i = 1, 2, 3;$

- при разностно – доплеровских измерениях

$$\Delta \dot{r}_{j1} = \dot{r}_j - \dot{r}_1, \quad (9)$$

$j = 2, 3, 4;$

- при квазидоплеровских измерениях

$$\dot{r}_i = \dot{r}_i + \delta \dot{r}_f, \quad (10)$$

$i = 1, 2, 3, 4,$

где $\delta \dot{r}_f$ – поправка радиальной скорости за счет расхождения частот генераторов приемника волномерного буя и спутника.

Системы уравнений (8) – (10) относительно составляющих скоростей $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ линейные, и способы их решения очевидны.

Кроме того, для определения координат движущегося волномерного буя может быть применен алгоритм из руководства [3]:

$$\sum_{j=1}^3 (x_{cij} - x_j)^2 = (r_i - \tau)^2, \quad (11)$$

(при условии, что измерения псевдодальностей до четырех спутников выполняются четырехканальным приемником).

Действительно, в этом случае измеренные псевдодальности можно отнести к единому моменту времени, поэтому однократная засечка четырех псевдодальностей позволяет зафиксировать мгновенное пространственное положение волномерного буя. Точность определения мгновенных координат не зависит от динамики буя, тем не менее уточнение этих координат за счет сглаживания быстрофлуктуирующих погрешностей измерений может быть осуществлено только при наличии информации о характере траектории буя, позволяющей осуществить счисление его координат в промежутках между измерениями псевдодальностей. Знание траектории движения буя (его динамики) необходимо для выработки текущих значений таких важных навигационных параметров, как составляющие вектора его скорости, в данном случае такая информация может быть получена с помощью математической модели, описывающей динамику. В приемнике должен применяться навигационный фильтр для моделирования движения волномерного буя. В качестве такого фильтра может быть использован дискретный фильтр Калмана и его модификации [6].

Фильтр строится на основе следующих моделей динамики объекта и измерений:

$$X_k = \Phi_{k-1} \cdot X_{k-1} + \tilde{A}_{k-1} \cdot W_{k-1}; \quad (12)$$

$$Z_k = H_k \cdot X_k + \nu_k, \quad (13)$$

где

X_k – вектор состояния;

Φ_k – матрица перехода;

H_k – матрица частных производных измерений;

Z_k – вектор измерений;

W_k – вектор возмущений (шумов) динамики объекта;

ν_k – вектор шумов измерений.

Движение буя моделируется динамической системой, возбуждаемой шумами. Переменные дифференциальных уравнений, описывающих эту систему, образуют вектор состояния X_k . Кроме этих переменных, в фильтре моделируются некоторые «мешающие» параметры – систематические погрешности измерений псевдодальности и псевдоскорости, которые также включаются в вектор состояния.

Для подвижных объектов (в нашем случае – волномерного буя) в вектор измерений Z , помимо псевдодальностей, включаются дельтапсевдодальности, которые по существу представляют собой результаты интегрирования доплеровского смещения частоты на конечном интервале $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. Если просуммировать на интервале $t_n - t_0$ дельтапсевдодальности, полученные

интегрированием доплеровской частоты с погрешностью ε_i в последовательные моменты времени t_i , получим приращение дальности на интервале $t_n - t_0$ с погрешностью $\sum_{i=0}^n \varepsilon_i$. Дисперсия этой суммы:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n E[\varepsilon_i \cdot \varepsilon_j]. \quad (14)$$

Как показано в работе [1], погрешности соседних измерений доплеровских интегралов коррелированы с коэффициентом $-0,5$:

$$E[\varepsilon_i \cdot \varepsilon_j] = \begin{cases} \sigma_{\varepsilon}^2 & \dots \dots \dots i = j \\ -0,5\sigma_{\varepsilon}^2 & \dots \dots \dots |i - j| = 1 \\ 0 & \dots \dots \dots |i - j| > 1 \end{cases}, \quad (15)$$

$$\text{тогда } \sigma_{\Sigma}^2 = (n+1)\sigma_{\varepsilon}^2 - 2 \cdot 0,5n\sigma_{\varepsilon}^2 = \sigma_{\varepsilon}^2. \quad (16)$$

Таким образом, среднеквадратическая погрешность приращения дальности доплеровским методом не зависит от длительности интервала интегрирования и от разбиения этого интервала на части. Последнее обстоятельство позволяет при непрерывных измерениях дельтапсевдодальностей до четырех спутников, исключив систематическую погрешность эталона частоты приемного устройства волномерного буя, построить траекторию его движения независимо от его динамики. Однако данное свойство дельтапсевдодальностей во всех описанных в литературе алгоритмах потребителей не используется. Измерения дельтапсевдодальностей обрабатываются просто как «чистые» измерения скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волосов П. С., Дубинко Ю. С. и др. Судовые комплексы спутниковой навигации. – Л.: Судостроение, 1983. – 272 с.
2. Ривкин С. С. Определение линейных скоростей и ускорений качки корабля инерциальным методом. – Л.: ЦНИИ «Рубин», 1980. – 198 с.
3. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцевич и др. Под ред. П. П. Дмитриева и В. С. Шебшаевича – М.: Радио и связь, 1982. – 272 с.
4. Бортовые устройства спутниковой радионавигации / Н. В. Кудрявцев, И. И. Мищенко, А. И. Волынкин и др. Под ред. В.С. Шебшаевича – М.: Транспорт, 1988. – 201 с.
5. Зайцев А. В., Резниченко В. И. Особенности функционирования спутниковой навигационной аппаратуры на морском объекте. // Навигация и гидрография. – 1985. – №1. – С. 56–60.
6. Зайцев А. В., Резниченко В. И. Определение путевой скорости корабля по сигналам среднеорбитной космической навигационной системы. // Записки по гидрографии. – 1982. – №208а. – С. 62–64.

Determination of the Running Co-ordinates and Motion Parameters for the Wave-measuring Buoy by Satellite Navigation Systems by Satellite Navigation Systems

V. N. BYSTROV, B. I. LOBOIKO, G. I ILYUSHCHENKO (GNINGI, RF MoD)

The algorithms that can be used to determine the co-ordinates and speed of the wave-measuring buoy are presented and analysed in brief.

ГРНТИ 67.21.23

КВАНТИЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВЯЗНОСТИ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ

**Н. Е. ИВАНОВ,
Ю. П. КЛЕВАНЦОВ**

(Санкт-Петербургское отделение
Государственного океанографического института),

В. А. РОЖКОВ
(Санкт-Петербургский Государственный университет)

Взаимосвязь колебаний уровня Балтийского моря в пунктах Шепелево и Кронштадт проанализирована по данным ежечасных измерений с 1989 по 2004 гг. Показано, что наиболее результативным является квантильное соотношение между распределениями значений уровня в этих пунктах.

В связи со строительством комплекса сооружений защиты Санкт-Петербурга от наводнений и их эксплуатацией стала актуальной оценка репрезентативности измерений уровня моря на Шепелевском гидролого-геодинамическом полигоне с целью их использования в качестве дублера Кронштадтского футштока. Отметим, что многолетние измерения уровня по этому футштоку положены в основу отсчитывания «нуля глубин» на морских картах, определения среднего уровня Балтийского моря и интенсивности вертикальных движений его побережий [1–7].

Цель работы состоит в установлении взаимосвязи колебаний уровня Балтийского моря в пунктах Шепелево и Кронштадт статистическими методами на основе модели связанных временных рядов.

Исходные данные

Исходными данными являются результаты ежечасных измерений уровня моря (см) за 16 лет с 1989 по 2004 гг. в пунктах Кронштадт X и Шепелево Y (морские гидрометеорологические станции второго разряда), полученные в Северо-Западном управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗ УГМС).

В пункте Шепелево имеются пропуски в 1989 г. (август – ноябрь), 1992 г. (сентябрь) и 1998 г. (апрель). Их непрерывная продолжительность составляет 4–192 часа, общая продолжительность 492 часа (менее 0,5%

общего объема измерений). В 1998 г. (июль – август) наблюдения в Шепелеве выполнялись по водомерной рейке четыре раза в сутки.

Изменчивость колебаний уровня

Наиболее общей моделью колебаний уровня в Финском заливе является модель нестационарного неоднородного случайного поля $\zeta(\vec{r}, t)$ пространственных координат \vec{r} , ($\vec{r} \in R$) и времени t , $t \in [0, T]$. Применительно к обсуждаемой проблеме можно воспользоваться частным случаем этой модели, когда $R \equiv (\vec{r}_1, \vec{r}_2)$, т. е. моделью связанных временных рядов.

Оценки автокорреляционных функций и спектральных плотностей в стационарном приближении обладают для пунктов Кронштадт и Шепелево большим сходством. В спектрах ежечасного уровня на общем красном шумовом фоне (убывание интенсивности колебаний от низких частот к высоким) имеются пики в области межгодовой изменчивости уровня и годовой гармонике ($\omega_0 = 2\pi/12$ радиан/месяц) с обертонами ($2\omega_0, 3\omega_0$). Если исключить из временных рядов аддитивную составляющую межгодовой изменчивости АС (последовательность среднегодовых значений) и годовую ритмику ГР (последовательность среднемесячных значений), то на фоне синоптической изменчивости на спектрах будут видны пики на приливных частотах.

В табл. 1 приведено распределение дисперсии колебаний уровня моря по диапазонам изменчивости. Из таблицы видно, что вклад всех диапазонов, кроме приливного и внутрисуточного, существенен, причем низкочастотные флюктуации уровня (с цикличностью более 10 суток) составляют почти 80% общей дисперсии.

Таблица 1

Распределение дисперсии (%) уровня моря по диапазонам изменчивости

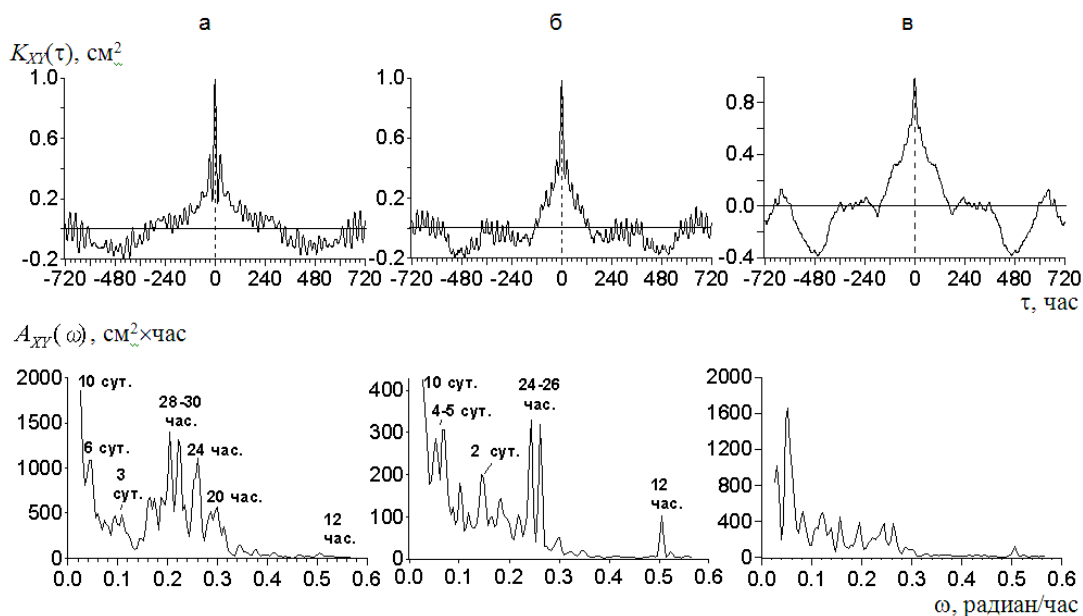
Пункт	Диапазон*								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кронштадт	19	18	10	17	14	20	1,5	0,5	<1
Шепелево	18	19	11	16	14	20	1,5	0,5	<1

Примечание. * 1 – межгодовая изменчивость; 2 – годовой ход с обертонами; 3 – межсезонная изменчивость (90–365 суток без годового хода и его обертонов); 4 – внутрисезонная изменчивость (30–90 суток); 5 – внутримесячная изменчивость (10–30 суток); 6 – синоптическая изменчивость (2–10 суток); 7 – суточный прилив; 8 – полусуточный прилив, 9 – внутрисуточная изменчивость (без приливов).

Пространственно-временная связность колебаний уровня

Анализ взаимных корреляционных функций $K_{XY}(\tau)$ в стационарном приближении для трех сезонов – с января по апрель (ледовый сезон), с мая по август (весенне-летний сезон) и с сентября по декабрь (осенний сезон) показал, что при наличии льда, а также весной и летом при сдвигах τ менее 5 суток коэффициент корреляции как в каждом из пунктов, так и между ними

остается выше 0,5, а осенью он опускается ниже этого уровня при сдвигах около 3 суток. На рис. 1 приведены оценки взаимных $K_{XY}(\tau)$ и амплитуды взаимной спектральной плотности $A_{XY}(\omega)$ для диапазона синоптической и внутрисуточной изменчивости. Исходные данные предварительно центрированы на АС и ГР. Из рисунка видно, что при сдвигах τ от нескольких часов до 2–5 суток (в зависимости от сезона) коэффициенты корреляции не превосходят 0,2. На графиках $A_{XY}(\omega)$ синоптические колебания проявляются как красный шум с отдельными биениями, а основной особенностью внутрисуточного диапазона являются приливные колебания.



Сезоны: а – ледовый (январь – апрель); б – весенне-летний (май – июль); в – осенний (сентябрь – декабрь)

Рис. 1. Оценки взаимных корреляционных функций $K_{XY}(\tau)$ и амплитуды взаимной спектральной плотности $A_{XY}(\omega)$ в стационарном приближении для диапазона синоптической изменчивости

В табл. 2 для колебаний с периодами от 10 суток до 12 часов приведены оценки функции когерентности $F^2(\omega)$, показывающие тесную зависимость во всем частотном диапазоне, и спектральной фазы $\Theta(\omega)$, показывающие, что характерное время запаздывания колебаний в Кронштадте по отношению к Шепелево не превышает 2–3 часов во всей частотной области. Отдельные случаи положительного фазового сдвига в весенне–летний сезон соответствуют запаздыванию колебаний в Шепелево по отношению к Кронштадту и требуют дополнительного анализа. Предварительно можно предположить, что такие явления могут иметь место при сгонных процессах.

Таблица 2

Оценки функции когерентности и спектральной фазы взаимных колебаний уровня моря в диапазоне синоптической изменчивости

ω	T		Сезон								
			январь – апрель			май – август			сентябрь – декабрь		
			F ²	Θ(ω)*		F ² (ω)	Θ(ω)*		F ² (ω)	Θ(ω)*	
радиан/ час	час.	сутки	-	град.	час.	-	град.	час.	-	град.	час.
0,026	240	10	0,99	-4	-2,7	0,99	-5	-3,3	0,99	-3	-2,0
0,035	192	8	0,99	-4	-2,1	0,99	-4	-2,1	0,99	-4	-2,1
0,039	168	7	0,99	-5	-2,3	0,98	-3	-1,4	0,98	-2	-0,9
0,044	144	6	0,99	-4	-1,6	0,99	0*	0,0	0,99	-1	-0,4
0,052	120	5	0,99	-1	-0,3	0,99	2*	0,7	0,99	-6	-2,0
0,065	96	4	0,99	-3	-0,8	0,99	-3	-0,8	0,99	-6	-1,6
0,087	72	3	0,98	-11	-2,2	0,99	-2	-0,4	0,98	-1	-0,2
0,131	48	2	0,98	-10	-1,3	0,97	-7	-0,9	0,98	-12	-1,6
0,175	36	1,5	0,99	-9	-0,9	0,98	-7	-0,7	0,99	-6	-0,6
0,209	30	1,25	0,99	-14	-1,2	0,99	-4	-0,3	0,96	-5	-0,4
0,262	24	1	0,99	-13	-0,9	0,99	-7	-0,5	0,99	-9	-0,6
0,314	20	0,83	0,99	-23	-1,3	0,96	2*	0,1	0,95	-14	-0,8
0,423	15	0,63	0,97	-37	-1,5	0,91	-10	-0,4	0,99	-24	-1,0
0,524	12	0,5	0,97	-25	-0,8	0,98	-22	-0,7	0,99	-19	-0,6

Примечания. * Отрицательная фаза означает запаздывание колебаний в Кронштадте по отношению к Шепелево. Заливкой выделена неотрицательная фаза.

В такой ситуации возникают два уточняющих вопроса:

1. Каковы пределы изменения значений τ_{\max} , при которых достигается максимальная корреляция ежечасных данных?

На этот вопрос позволяет ответить табл. 3, в которой приведена повторяемость значений τ_{\max} по (12×16) месячным выборкам. Из таблицы следует, что при среднем значении $m_{\tau_{\max}} = -1,1$ час и среднеквадратическом отклонении $\sigma_{\tau_{\max}} = 0,4$ час в 90% случаев максимальная корреляция отмечается при запаздывании уровня в Кронштадте по отношению к Шепелево на 1 час, в 8% случаев – при запаздывании на 2–5 часов и еще в 2% случаев – для синхронных данных. По месячным выборкам не обнаружено ситуаций, когда максимуму корреляции соответствует запаздывание уровня в Шепелево по отношению к Кронштадту.

Повторяемость $P(\%)$ значений сдвигов τ_{max} (час), обеспечивающих максимальную корреляцию ежечасного уровня

τ_{max}	-5	-4	-3	-2	-1	0
P	0,5	3,1	–	4,7	89,6	2,1

Примечание. Отрицательный сдвиг соответствует запаздыванию уровня Кронштадта по отношению к Шепелево.

2. Каковы дисперсия остатка в уравнении линейной регрессии и величина коэффициента детерминации?

Для ответа на этот вопрос проанализирована зависимость между ежечасными значениями уровня в Кронштадте и Шепелево по месячным выборкам по линейной регрессионной модели [8] для сдвига τ_{max}

$$Y_i = a * X_i + b * + \varepsilon . \quad (1)$$

Для проверки гипотезы $a=0$ отсутствия линейной связи использован критерий

$$F^* = \frac{MS1}{s^2}, \quad (2)$$

в котором $MS1$ – средний квадрат, обусловленный регрессией, s^2 – средний квадрат аномалий относительно регрессии. Для выборок объемом 720 значений регрессия значима на 95% уровне, если $F^* > 3,85$. В нашем случае оценка F^* составляет в зависимости от месяца 10^3 – 10^5 , т. е. на несколько порядков превышает критическое значение.

Если $a^* \neq 0$, наличие регрессии подтверждается коэффициентом детерминации

$$R^2 = \frac{SS1}{SS}, \quad (3)$$

где $SS1$ – сумма квадратов, обусловленная регрессией, SS – полная сумма квадратов.

В табл. 4 для (16×12) пар месячных выборок приведено распределение оценок параметров регрессии a^* , b^* модели (1), среднеквадратического отклонения (СКО) остатка σ_ε , максимального значения модуля остатка $\max_{|\varepsilon|}$ и коэффициента R^2 .

Таблица 4

Повторяемость P параметров линейной регрессии* $Y=aX=b+\epsilon$ и коэффициента детерминации R^2

Параметр	Градации [от – до] и повторяемость P , %				
	a	[0,80–0,84]	[0,85–0,89]	[0,90–0,94]	[0,95–0,99]
	1	14	45	36	4
b , см	[-12 – -1]	[0–20]	[21–40]	[41–60]	[61–94]
	5	28	38	18	4
σ_ϵ , см	1	2	3	4	[5 – 6]
	7	63	24	3	2
$\max \epsilon $, см	[3–5]	[6–10]	[11–15]	[16–20]	[21–30]
	7	53	28	7	5
R^2	[0,90–0,94]	[0,95–0,97]	0,98	0,99	1,00
	3	23	30	39	5

Примечание. Уравнение * получено при сдвиге τ_{\max} , обеспечивающем максимальную корреляцию (см. табл. 3)

Из табл. 4 следует, что коэффициент a регрессии (1) варьирует в диапазоне от 0,80 до 1,02, 95% значений попадают в интервал от 0,85 до 0,99. Свободный член b варьирует в диапазоне от 12 до +94 см, 90% значений попадают в интервал от 0 до 60 см. Ошибка регрессии в среднем относительно невелика – среднеквадратическое значение σ_ϵ варьирует в диапазоне от –1 до +6 см, причем 95% значений не превышают 3 см. Однако в отдельные месяцы максимальное значение ϵ достигает по абсолютной величине 30 см, а около 90% значений $\max|\epsilon|$ попадают в интервал от 6 до 20 см. Коэффициент детерминации R^2 варьирует в диапазоне от 0,9 до 1,0, причем 95% его значений составляют 0,95 и более.

Пункты Кронштадт и Шепелево расположены на расстоянии примерно 30 миль друг от друга в узком заливе. При таком пространственном сдвиге могут оказывать влияние на взаимосвязь колебаний уровня только флюктуации в диапазоне синоптической изменчивости. Для подтверждения этой гипотезы в табл. 5 приведены среднегодовые значения $\bar{X}(t)$, $\bar{Y}(t)$ и оценки амплитуд $|a_k|(t)$ годовой ($k=1$) и полугодовой ($k=2$) гармоник годового хода. Оценки фаз годовой и полугодовой гармоник в пунктах Кронштадт и Шепелево совпадают. Из таблицы видно, что межгодовые вариации существенны и происходят в двух рассмотренных пунктах согласованно. Дальнейший анализ выполнен по выборкам ежечасных измерений за один

календарный месяц с учетом аддитивной составляющей межгодовой изменчивости и годовой ритмики с переменными от года к году параметрами.

Таблица 5

Среднегодовые значения и оценки $\bar{\zeta}(t)$ и оценки амплитуд $a_k(t)$ и фаз $\varphi_k(t)$ годовой ($k=1$) и полугодовой ($k=2$) гармоник в пунктах Кронштадт (X) и Шепелево (Y)

Год	$\zeta(t)$		$a_1(t)$		$a_2(t)$		Год	$\zeta(t)$		$a_1(t)$		$a_2(t)$	
	X	Y	X	Y	X	Y		X	Y	X	Y	X	Y
	см		см		см			см		см		см	
1989	521	515	22	21	18	19	1997	507	502	10	10	21	21
1990	520	514	23	20	17	17	1998	511	506	12	12	17	17
1991	507	503	21	19	13	11	1999	507	503	17	18	11	11
1992	514	509	18	18	15	15	2000	510	506	15	15	20	21
1993	505	500	10	10	33	33	2001	505	500	15	15	8	7
1994	506	501	12	12	11	11	2002	504	498	22	21	21	21
1995	512	507	14	14	8	8	2003	503	497	15	15	9	8
1996	488	484	17	16	22	22	2004	513	507	17	16	9	9

Модель колебаний уровня

Традиционно построение вероятностных моделей [9–11] системы случайных процессов начинается с модели авторегрессии скользящего среднего в виде

$$\zeta_t^{(k)} = \sum_j^p \Phi_j \zeta_{t-j}^{(k)} + \sum_{j=0}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}^{(k)}, \quad (4)$$

где Φ_j, θ_j – параметры авторегрессии (АР) и скользящего среднего (СС); ε_t – белый шум с заданным законом распределения $F_{\varepsilon_t^{(k)}}(x)$. Таким образом, кроме оценок параметров Φ_j, θ_j , вычисляемых через функции $K_X(\tau), K_Y(\tau), K_{XY}(\tau)$, необходимо знать еще и функции распределения $F_{\zeta^{(1)}}(x), F_{\zeta^{(2)}}(x), F_{\zeta^{(1)\zeta^{(2)}}}(x)$.

Распределение уровня моря и его квантили

Оценки коэффициентов асимметрии A и эксцесса E по месяцам показывают, что в большинстве месяцев оценки A, E отличны от 0, обладают сильной сезонной и межгодовой изменчивостью и могут достигать очень больших значений – A изменяется от $-2,5$ до $+2,0$, E изменяется от $-1,5$ до $+10,8$. В табл. 6 приведено количество нулевых, значимо положительных и значимо отрицательных оценок A, E . Из таблицы следует, что для распределения уровня характерны положительные асимметрия во все месяцы (50–90% случаев в зависимости от месяца) и положительный эксцесс в большинстве месяцев (30–90% случаев в зависимости от месяца). Отрицательные A, E отмечаются не более чем в 30% и 40% случаев соответственно, а незначимые A, E – не более чем в 30% и 45% случаев.

Таблица 6

Количество (%) нулевых, положительных и отрицательных оценок коэффициентов асимметрии A , эксцесса E и критерия α

		Кронштадт, месяц												Шепелево, месяц											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	-*	18	18	18	30	25	-	6	38	30	18	25	18	18	12	25	30	25	12	6	38	18	18	25	25
	0	18	12	30	6	6	30	12	-	12	6	6	-	18	12	18	6	25	25	18	-	3	6	12	6
	+*	64	70	52	64	69	70	88	72	58	76	69	82	64	76	57	64	50	63	76	62	79	76	59	69
E	-*	12	18	18	12	30	25	12	6	18	12	-	6	12	18	18	18	25	25	18	-	25	12	-	-
	0	30	30	30	25	6	30	25	18	25	38	12	25	38	38	18	12	-	44	25	38	38	44	12	25
	+*	58	52	52	59	64	45	59	76	57	50	88	69	50	44	64	70	75	31	57	62	37	44	88	75
α	-	12	-	6	6	12	-	6	-	-	6	6	-	12	-	-	12	12	-	6	6	6	-	-	-
	0	76	75	82	76	58	75	76	70	88	94	64	61	76	75	88	76	63	88	76	82	82	94	70	70
	+	12	25	12	18	30	25	18	30	12	-	30	39	12	25	12	12	25	12	18	12	12	6	30	30

Примечания: *Гипотеза $A=0, E=0$ отвергается на 95 % уровне при $|A^*|>0,15, |E^*|>0,31$ [12]

Для нормального распределения $A=0, E=0$, при других значениях A и E используется разложение эмпирического распределения $f_3(x)$ в ряд Грамма-Шалье [13]:

$$f_{\text{э}}(x) = f(x) + \sum_{i=1}^4 a_i f^{(i)}(x), \quad (5)$$

где a_i – коэффициенты разложения, $f(x)$ имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2), \quad (6)$$

производные нормального распределения (6) записываются в виде

$$f^{(n)}(x) = (-1)^{(n)} H_n(x) f(x) \quad (7)$$

через полиномы Эрмита

$$H_3 = x^3 - 3x, \quad H_4 = x^4 - 6x^2 + 3. \quad (8)$$

Для центрированных (на среднее m) и нормированных (на СКО σ) значений $x^o = (x - m) / \sigma$ величины $a_1 = a_2 = 0$ и основное значение имеют третий и четвертый члены разложения (5). При $a_3 < 0,6$ и $a_4 < 2,0$ выражение (5) хорошо аппроксимирует одновершинные распределения, при $A \in [0,6; 1,2]$, $E \in [2,0; 4,0]$ аппроксимация (5) может привести к отрицательным $f(x)$.

Кривые Пирсона [13] типизированы по параметру α , характеризующему соотношение A и E . Согласно табл. 5 в 60–95% (в зависимости от месяца) $\alpha = 0$, но в отдельные месяцы до 12% случаев $\alpha > 0$, до 40% случаев $\alpha < 0$. Наибольший интерес представляет случай, когда $\alpha < 0$. Тогда вместо (5) более предпочтительна аппроксимация

$$f_{\text{э}}(x) dx = \left(1 + \frac{x}{l_1}\right)^{q_1} \left(1 - \frac{x}{l_2}\right)^{q_2}. \quad (9)$$

Параметры в формуле (9) вычисляются через третий r_3 и четвертый r_4 моменты распределения по формулам (10–11)

$$s = \frac{6(r_4 - r_3^2 - 1)}{(3r_3^2 - 2r_4 + 6)}, \quad t = \sqrt[4]{(s+1)(1-k)}, \quad (10)$$

$$q_{1,2} = \frac{1}{2} \left[(s-2) \pm s \left(s + 2 - \frac{r_3}{t} \right) \right], \quad l_1 = \frac{q_1 l}{s-2}, \quad l_2 = \frac{q_2 l}{s-2}, \quad k = \frac{\sigma t}{2}, \quad l = l_1 + l_2. \quad (11)$$

Подчеркнем, что формула (9) существенно отличается от выражения (5) дробностью показателей q и усеченностью распределений в точках $l_{1,2}$. Условные распределения могут быть аппроксимированы аналогичными распределениями, а двумерные – их комбинацией с учетом коэффициента корреляции.

Внутримесячное распределение можно считать нормальным по критерию $A=0$, $E=0$ лишь в 3% случаев, использование аппроксимации (9) предпочтительно в 25% случаев, а наиболее употребительна аппроксимация (5) – 72 % случаев.

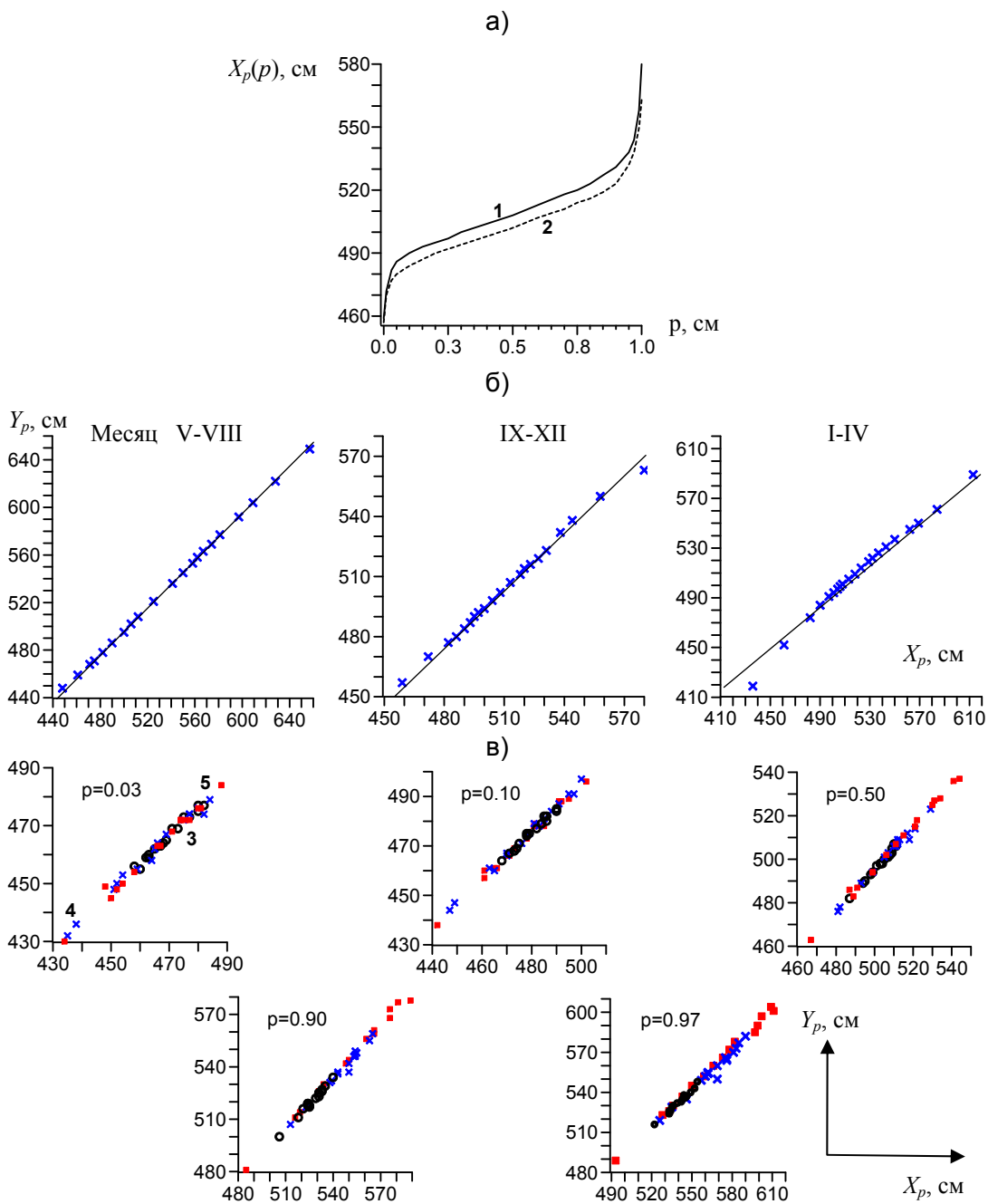
С учетом отличия распределения вероятностей от нормального взаимосвязь уровня в Кронштадте и Шепелеве рассмотрим в терминах квантильного соотношения

$$Y_p = aX_p + b + \varepsilon^* \quad (12)$$

Квантили распределения уровня приведены на рис. 2а, а графики соотношения (12) при всех p для трех сезонов (на примере 1990 г.) по данным ежечасных измерений приведены на рис. 2б. Из рисунка видно, что заметные отклонения от прямолинейной зависимости характерны только для краев распределения. Расчет параметров соотношения (12) по календарным месяцам показал, что коэффициент a изменяется в относительно узком диапазоне – от 0,77 до 1,03. Годовой ход среднего значения $m_a(t)$ и экстремумов межгодовой изменчивости $\min_a(t)$, $\max_a(t)$ обнаруживает слабовыраженную тенденцию к увеличению коэффициента a в ледовый сезон и показывает, что диапазон межгодовой изменчивости заметно шире размаха среднего многолетнего годового хода. Свободный член b зависит от соотношения средних значений m_X , m_Y , поэтому вполне естественны его сильные изменения от месяца к месяцу.

Остаток ε в соотношении (12) проанализирован в терминах среднеквадратического σ_ε и максимального $\text{MAX}\{\varepsilon\}$ за календарный месяц значений. В табл. 7 приведен годовой ход средних многолетних $m(t)$ и максимальных за 16 лет $\max(t)$ значений этих оценок. Среднеквадратическое значение σ_ε не превышает 4–5 см, причем в 97% случаев оно составляет 0–2 см, максимум ε составляет 0–17 см в зависимости от месяца, наибольшие значения ε характерны для зимних месяцев.

Сравнение остатков ε в квантильном соотношении (12) и в регрессии (1) в табл. 7 и сопоставление с табл. 4 показывает, что (1) приводит к разбросу ε большему, чем (12).



Пункты: 1 – Кронштадт, 2 – Шепелево,
 Сезоны: 3 – весенне-летний (май – август), 4 – осенний (сентябрь – декабрь),
 5 – ледовый (январь – апрель)
 а – квантили распределения, б – общие квантильные соотношения $Y_p=aX_p+b$; в – квантильные соотношения $Y_p=a_pX_p+b_p$ при фиксированном p .

Рис. 2. Квантильное соотношение ежечасных значений уровня моря в Кронштадте (X) и Шепелеве (Y)

Таблица 7

Годовой ход среднего значения и экстремумов абсолютного значения остатков ε квантильного соотношения $Y_p=aX_p+b+\varepsilon$, регрессии $Y=aX+b+\varepsilon$, и квантильного соотношения $Y_p=a_pX_p+b_p+\varepsilon_p$ при фиксированном порядке p

	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	$Y_p=aX_p+b+\varepsilon^*$											
	σ_ε											
$m(t)$	1,1	0,5	0,7	0,3	0,9	0,8	0,4	0,7	0,7	1,0	1,5	1,4
$\max(t)$	5	2	2	2	2	2	2	1	2	2	3	4
	$\text{MAX}\{\varepsilon\}$											
$m(t)$	4,2	2,2	2,2	2,2	2,4	2,9	2,6	2,6	2,1	3,5	4,1	3,9
$\max(t)$	17	7	7	6	7	8	7	6	6	8	10	10
	$Y_p=a_pX_p+b_p+\varepsilon_p^*$											
	$\sigma_{\varepsilon_p^*}$											
$p=\min$	4	3	3	2	2	1	1	3	3	3	5	6
$p=0,50$	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2
$p=\max$	8	3	3	3	5	5	4	4	2	4	7	6
	$\text{MAX}\{\varepsilon_p^*\}$											
$p=\min$	9	10	8	4	3	3	12	5	7	7	13	13
$p=0,50$	4	3	3	3	2	3	3	1	2	4	3	5
$p=\max$	23	7	9	8	15	10	7	6	5	8	20	12
	$Y=aX+b+\varepsilon'$											
	$\sigma_{\varepsilon'}$											
$m(t)$	2,2	1,4	1,3	1,6	1,9	2,1	1,8	1,5	1,9	2,3	2,3	2,4
$\max(t)$	5	3	3	5	3	3	3	3	2	5	4	6
	$\text{MAX}\{\varepsilon'\}$											
$m(t)$	13,3	8,3	7,9	8,4	10,8	11,6	10,7	8,0	9,7	12,6	10,5	12,1
$\min(t)4$	3	3	4	6	8	6	5	6	6	6	5	6
$\max(t)$	29	15	18	21	30	22	24	14	16	26	18	25

Примечание: *минимальный остаток $\min(t)$ не превышает 1 см

На рис. 2в приведены примеры графиков зависимости (12) для нескольких фиксированных p . Оценки параметров (12) по месяцам указывают на слабую зависимость a_p как от сезона, так и от p . Для остатков ε_p^* такая зависимость существует. Оценки годового хода средних многолетних $m(t)$ и максимальных $\max(t)$ значений среднеквадратического ε_p^* и экстремального $\max\{\varepsilon_p^*\}$ значений в табл. 7 показывают, что значительные отклонения ε_p^* от прямолинейной зависимости (4–8 см в среднеквадратическом и 7–25 см максимально) характерны на краях распределения в осенне-зимние месяцы.

В табл. 8 приведены для трех сезонов примеры оценки двумерного распределения $F_{\zeta\eta}(x,y,t)$ по данным ежечасных измерений. Видно, что в окрестности центра распределения ненулевые значения повторяемости сосредоточены вдоль диагонали, а на краях распределение становится более размытым. Соответствующие этой таблице графики точечных диаграмм и оценок условного $m_{УХ}$ математического ожидания $m_{УХ}$ и условного СКО $\sigma_{УХ}$ приведены на рис. 3. На краях распределения заметны отклонения от линейной аппроксимации и увеличение разброса.

Таблица 8

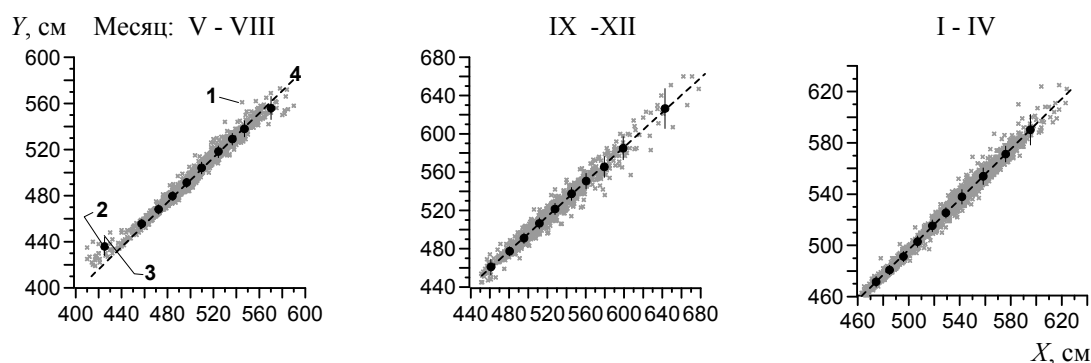
Двумерная* повторяемость (%) совместного распределения ежечасных значений уровня моря в Кронштадте и Шепелеве в весенне-летний, осенний и ледовый сезоны

Сезон: май – август										
Градации, см	414–450	451–464	465–478	479–491	492–504	505–518	519–532	533–542	543–555	>555
414–450	1,5	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-
451–464	0,8	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-
462–478	0,2	1,9	9,8	-	-	-	-	-	-	-
479–491	-	-	8,9	16,6	-	-	-	-	-	-
492–504	-	-	-	10,3	12,9	-	-	-	-	-
505–518	-	-	-	-	7,7	8,6	0,1	-	-	-
519–532	-	-	-	-	-	4,4	5,3	0,3	0,1	0,1
533–542	-	-	-	-	-	-	3,2	1,7	0,2	0,1
543–555	-	-	-	-	-	-	0,4	1,8	0,8	0,3
>555	-	-	-	-	-	-	0,2	0,1	1,3	0,7
Сезон: сентябрь – декабрь										
Градации, см	440–470	471–487	488–504	505–521	522–538	539–555	556–572	573–590	591–620	>620
440–470	1,4	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
471–487	0,9	6,4	-	-	-	-	-	-	-	-
488–504	0,2	6,0	21,7	-	-	-	-	-	-	-
505–521	0,1	0,1	8,9	19,0	-	-	-	-	-	-
522–538	-	-	-	8,3	9,8	-	-	-	-	-
539–555	-	-	-	-	4,9	5,1	-	-	-	-
556–572	-	-	-	-	-	3,0	1,1	-	-	-
573–590	-	-	-	-	-	-	0,8	0,6	0,2	0,1
591–620	-	-	-	-	-	-	-	0,9	0,6	0,2
>620	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,4

Таблица 8 (продолжение)

Сезон: январь – апрель										
Градации, см	460–480	481–491	492–502	503–513	514–524	525–535	536–550	551–570	571–585	>585
460–480	6,6	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
481–491	4,4	65	-	-	-	-	-	-	-	-
492–502	0,2	3,8	3,9	-	-	-	-	-	-	-
503–513	0,1	0,3	2,4	3,4	-	-	-	-	-	-
514–524	-	-	-	2,4	5,5	-	-	-	-	-
525–535	-	-	-	-	5,3	10,2	-	-	-	-
536–550	-	-	-	-	-	5,8	13,4	0,4	0,1	0,2
551–570	-	-	-	-	-	-	4,7	12,5	0,3	0,2
571–585	-	-	-	-	-	-	-	2,1	2,7	0,8
>585	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	1,5

Примечание. * Строка – Кронштадт, столбец – Шепелево.



1 – измерения, 2 – условное математическое ожидание $m_{Y|X}$,
 3 – условное СКО $\sigma_{Y|X}$ 4 – линейная регрессия $Y=aX+b+\epsilon$.

Рис. 3. Эмпирическая и линейная регрессия ежечасного уровня моря в Кронштадте (X) и Шепелеве (Y)

Выводы

1. Наиболее результативной характеристикой взаимосвязи колебаний уровня моря в пунктах Кронштадт и Шепелево является близкое к линейному квантильное соотношение с параметрами, зависящими от сезона и года, с учетом аддитивной и модуляционной составляющих межгодовой изменчивости.
2. Совместный (двумерный) и маргинальные законы распределения колебаний уровня моря в Кронштадте и Шепелеве варьируют от

нормального до Грамма-Шалье и даже до кривых Пирсона. Параметры этих законов распределения изменяются в широком диапазоне значений.

3. Регрессия приводит к разбросу большему, чем квантильное соотношение. При оценивании параметров регрессии необходимо учитывать фазовый сдвиг. Запаздывание колебаний уровня в Кронштадте по сравнению с Шепелево в 1889–2004 гг. изменяется от 0 до 5 часов, в подавляющем большинстве случаев оно составляет 1 час.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с уточнением характеристик зависимости за весь период инструментальных измерений с привлечением данных измерений на побережье Копорской губы и для различных типов изменчивости уровня моря – в первую очередь, при сильных наводнениях и сгонах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенин В. А., Каманин Л. Г., Мещеряков Ю. А. Современные вертикальные движения морской коры. //Тр. ЦНИИГАИКЮ. – 1958. Вып. 123.
2. Лазаренко Н. Н. Колебания уровня Балтийского моря // – Тр. ГОИН. – 1961. Вып. 65. – С. 39–127.
3. Победоносцев С. В. Океанографические методы определения современных вертикальных движений побережий морей. //Колебания уровня моря. – М., Радио и связь. – 1982. – С. 8–18.
4. Проект «Моря СССР». Гидрология и гидрохимия морей СССР. Том III «Балтийское море». Вып. 1 «Гидрометеорологические условия». – СПб., Гидрометеиздат, 1992. – 450 с.
5. Средний уровень Балтийского моря. – Л., 1951. – 399 с.
6. Уровень моря и вертикальные движения побережий Балтийского моря. //Изменения уровня моря. – М., Изд-во Моск. ун-та, 1982. – С. 143–149.
7. Якубовский О. В. Уточненная карта вертикальных движений земной коры побережья Балтийского моря. // Современные движения земной коры. – Тарту, 1973. – № 5. – С. 72–78.
8. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Кн. 1. – М., Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
9. Поляк И. И. Многомерные статистические модели климата. – Л., Гидрометеиздат, 1989. – 184 с.
10. Рожков В. А. Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. – СПб., Гидрометеиздат, 1996. – 560 с.
11. Рожков В. А., Трапезников Ю. А. Вероятностные модели океанологических процессов. – Л., Гидрометеиздат, 1990. – 272 с.
12. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М., ВЦ АН СССР, 1968. – 474 с.
13. Рожков В. А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. – СПб, Гидрометеиздат. Кн. 1. – 2001. – 340 с. Кн. 2. – 2002. – 778 с.

The Quantile Analysis of Interrelation of the Sea Level Fluctuations in the Gulf of Finland

N. E. IVANOV, Y. P. KLEVANTSOV (State Oceanographic Institute, St. Petersburg branch),

V. A. ROZHKOV (State Oceanographic Institute, St. Petersburg branch; St. Petersburg State University)

The interrelation of the Baltic Sea level fluctuations in the points Shepelevo and Kronstadt using the data of hourly measurements in 1889-2004 is analysed. It is shown that quantile relationship between the distributions of sea level values in these points is the most effective.

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУАССОНА, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ НАМАГНИЧЕННОСТЬ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

П. И. МАЛЕЕВ,
И. В. КАПУСТИН (ГНИНГИ МО РФ),
Б. М. СМЕРНОВ (АОЗТ «КРИОМАГ»)

Рассмотрено решение задачи снижения влияния вариаций геомагнитного поля на погрешность определения параметров Пуассона, характеризующих намагниченность подвижного объекта.

Параметры Пуассона, характеризующие намагниченность подвижного объекта, используются для разделения внешнего магнитного поля, в частности геомагнитного поля, и магнитного поля объекта [1–6]. Отделение внешнего магнитного поля от магнитных помех подвижного объекта позволяет решать задачи магнитной совместимости бортовой магнитометрической аппаратуры с подвижным объектом для:

- проведения магнитных съемок;
- определения местоположения объекта в «магнитном полигоне»;
- исследования магнитного поля околоземного пространства и магнитного поля планет с космических аппаратов;
- определения местоположения одного подвижного подводного объекта относительно другого с целью предотвращения их столкновения и решения ряд других задач [3, 7–9].

Параметрами, определяющими намагниченность подвижного объекта, являются составляющие вектора магнитной индукции от индуктивной намагниченности объекта, которые характеризуются параметрами Пуассона, и составляющие вектора магнитной индукции от постоянной намагниченности объекта [3]. В технических решениях [1–6] определение параметров Пуассона в месте размещения магнитометрического датчика на объекте и проекций вектора магнитной индукции от постоянной намагниченности объекта осуществляется по измеренным модулям или проекциям векторов магнитной индукции при определенных угловых положениях подвижного объекта и известной индукции геомагнитного поля. Однако при этом не исключаются погрешности от вариаций геомагнитного поля, которые могут быть недопустимо большими. Учет вариаций геомагнитного поля позволяет исключить или существенно снизить эти погрешности. Рассмотрим возможные пути исключения их влияния на параметры Пуассона.

Определить параметры Пуассона с учетом вариаций геомагнитного поля по результатам измерений магнитной индукции бортовыми магнитометрическими датчиками в общем случае можно следующим образом.

Трехкомпонентный магнитометр 1 (рис. 1), включающий магниточувствительный датчик 2, размещают на подвижном объекте так,

чтобы оси чувствительности его датчика были коллинеарны соответствующим строительным осям системы координат $OXYZ$ и осям инерциальной навигационной системы 3 подвижного объекта 4. Ось OX совпадает с продольной осью объекта 4, ось OY перпендикулярна оси OX , а ось OZ нормальна плоскости OXY объекта 4.

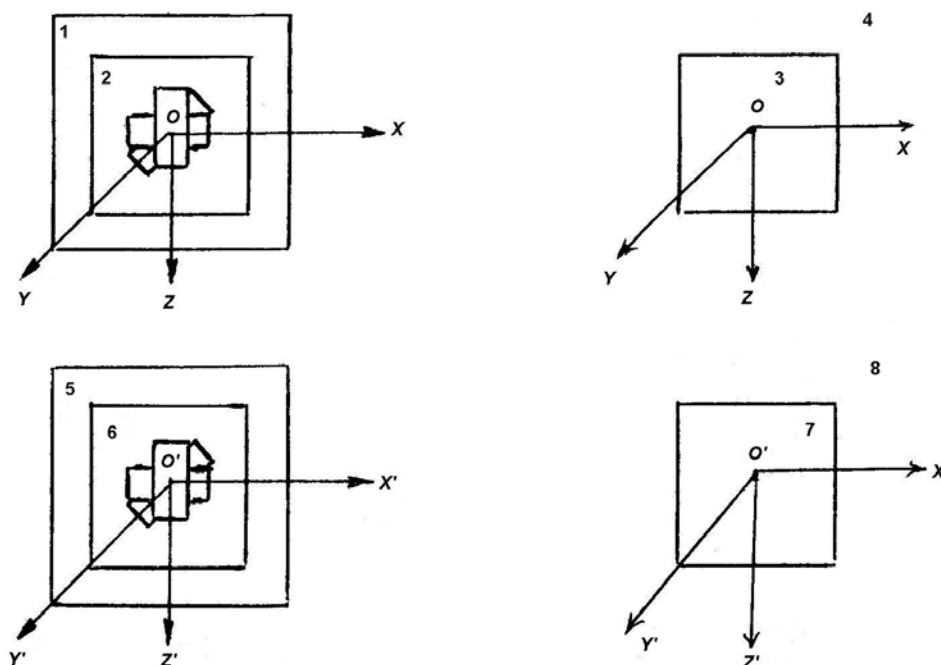


Рис. 1. Структурная схема устройства, позволяющего повысить точность определения параметров Пуассона, характеризующих намагниченность подвижного ферромагнитного объекта (пояснения в тексте)

Аналогичное устройство, состоящее из трехкомпонентного магнитометра 5, включающего магниточувствительный датчик 6 и инерциальную навигационную систему 7, размещают и на немагнитном объекте 8 (рис. 1). Оси чувствительности датчика 6 коллинеарны соответствующим осям строительной системы координат $O^1X^1Y^1Z^1$ немагнитного объекта 8. Ось O^1X^1 совпадает с продольной осью объекта 8, ось O^1Y^1 перпендикулярна оси O^1X^1 , оси O^1Z^1 и нормальна плоскости $O^1X^1Z^1$ объекта 8. При этом расстояние между объектами 4 и 8 должно быть более трехкратного наибольшего линейного размера объекта 4 [10].

Магнитометры 1 и 5 измеряют проекции векторов магнитной индукции на оси чувствительности соответствующих датчиков 2 и 6, например, при шести угловых положениях объектов. Проекции вектора магнитной индукции $B_{xi} B_{yi} B_{zi}$ для i -го углового положения объекта 4, измеренного магнитометром 1 синхронно с углами курса, крена, тангажа объекта 4 можно представить в виде:

$$B_{xi} = (1+a)F_{1i} + bF_{2i} + cF_{3i} + B_{xp}; \quad (1)$$

$$B_{yi} = dF_{1i} + (1+e)F_{2i} + fF_{3i} + B_{yp}; \quad (2)$$

$$B_{zi} = gF_{1i} + hF_{2i} + (1+k)F_{3i} + B_{zp}, \quad (3)$$

где $a, b, c, d, e, f, g, h, k$ – параметры Пуассона объекта 4 в месте размещения датчика 2;

$$F_{1i} = l_{1i} B_{xti} + m_{1i} B_{yti} + n_{1i} B_{zti}; \quad (4)$$

$$F_{2i} = l_{2i} B_{xti} + m_{2i} B_{yti} + n_{2i} B_{zti} \quad (5)$$

$$F_{3i} = l_{3i} B_{xti} + m_{3i} B_{yti} + n_{3i} B_{zti}, \quad (6)$$

где $(l_{1i}, m_{1i}, n_{1i}), (l_{2i}, m_{2i}, n_{2i}), (l_{3i}, m_{3i}, n_{3i})$ – направляющие косинусы осей системы координат в опорной географической системе координат, являющиеся функциями углов курса Φ , крена θ , тангажа Ψ объекта 4;

$i = 1; 2; 3; 4; 5; 6$ – номера угловых положений объекта 4;

$B_{xti}, B_{yti}, B_{zti}$ – проекции вектора индукции геомагнитного поля на оси опорной географической системы координат для i – го углового положения объекта 4 при наличии вариаций геомагнитного поля и промышленных магнитных помех, которые за время измерения углового положения объекта 4 могут изменяться;

B_{xp}, B_{yp}, B_{zp} – проекции вектора магнитной индукции от постоянной намагниченности объекта 4 в месте размещения датчика 2.

Для объекта 8 проекции вектора магнитной индукции $B_{xi}^1, B_{yi}^1, B_{zi}^1$, измеренные датчиком 6 синхронно с углами курса Φ^1 , крена Θ^1 , тангажа Ψ^1 немагнитного объекта 8 и с $B_{xti}, B_{yti}, B_{zti}$, можно представить в виде:

$$B_{xi}^1 = l_{1i}^1 B_{xti} + m_{1i}^1 B_{yti} + n_{1i}^1 B_{zti}; \quad (7)$$

$$B_{yi}^1 = l_{2i}^1 B_{xti} + m_{2i}^1 B_{yti} + n_{2i}^1 B_{zti}; \quad (8)$$

$$B_{zi}^1 = l_{3i}^1 B_{xti} + m_{3i}^1 B_{yti} + n_{3i}^1 B_{zti}, \quad (9)$$

где $(l_{1i}^1, m_{1i}^1, n_{1i}^1), (l_{2i}^1, m_{2i}^1, n_{2i}^1), (l_{3i}^1, m_{3i}^1, n_{3i}^1)$ – направляющие косинусы осей системы координат $O^1 X^1 Y^1 Z^1$ в опорной географической системе координат, являющиеся функциями углов курса, крена, тангажа объекта 8;

i – номер углового положения объекта 8, соответствующий номеру углового положения объекта 4.

Пусть, например, объект 4 в определенные моменты времени принимает следующие шесть угловых положений.

При $i = 1$ углы курса, крена, тангажа равны соответственно Φ_1, Θ_1, Ψ_1 для объекта 4 и $\Phi_1^1, \Theta_1^1, \Psi_1^1$ для объекта 8.

При $i = 2$ углы курса, крена, тангажа соответственно $\Phi_2 = \Phi_1 + 90^\circ$, $\Theta_2 = \Theta_1$, $\Psi_2 = \Psi_1$, для объекта 4 и Φ_2^1 , Θ_2^1 , Ψ_2^1 – для объекта 8. Слагаемое Φ_1 , входящее в Φ_2 , значения Θ_2 и Ψ_2 могут отличаться от Φ_1 , Θ_1 , Ψ_1 из-за рыскания и качки объекта 4.

При $i = 3$ углы курса, крена, тангажа будут равны соответственно $\Phi_3 = \Phi_2 + 90^\circ$, $\Theta_3 = \Theta_2$, $\Psi_3 = \Psi_2$ для объекта 4 и Φ_3^1 , Θ_3^1 , Ψ_3^1 – для объекта 8. Слагаемое Φ_2 , входящее в Φ_3 , значения Θ_3 и Ψ_3 , могут также отличаться, соответственно, от Φ_2 , Θ_2 , Ψ_2 по тем же причинам.

При $i = 4$ изменяется только угол курса на 90° относительно предыдущего.

При $i = 5$ углы курса и тангажа остаются как и при $i = 4$ неизменными, а угол крена изменяют на $\Delta\Theta$.

При $i = 6$ угол курса относительно предыдущего изменяется на 180° , а углы крена и тангажа соответствуют положениям при $I = 5$.

Из системы уравнений (7) – (9) определяют B_{xti} , B_{yti} , B_{zti} и подставляют их в выражения (4) – (6), а полученные значения F_{1i} , F_{2i} , F_{3i} – в (1) – (3). Затем из системы уравнений для $B_{x1} - B_{x3}$, $B_{x2} - B_{x4}$, $B_{x5} - B_{x6}$ находят параметры Пуассона a , v , c ; из системы уравнений для $B_{y1} - B_{y3}$, $B_{y2} - B_{y4}$, $B_{y5} - B_{y6}$ – параметры d , e , f ; из системы уравнений для $B_{z1} - B_{z3}$, $B_{z2} - B_{z4}$, $B_{z5} - B_{z6}$ – параметры g , h , k . Подставляя полученные значения a , v , c в (1), значения d , e , f в (2) и значения g , h , k в (3), определяем B_{xp} , B_{yp} , B_{zp} .

Таким образом, совместное использование двух трехкомпонентных магнитометров по рассмотренной схеме позволяет исключить или ослабить влияние вариаций геомагнитного поля на параметры Пуассона.

При известном магнитном склонении в районе определения параметров Пуассона для каждого i -го углового положения объекта 8 измеряют углы крена Θ_i^1 и тангажа Ψ_i^1 , проекции вектора магнитной индукции B_{xi}^1 , B_{yi}^1 , B_{zi}^1 магнитометром 5, которые подставляют в систему уравнений (7) – (9), а затем, приняв $B_{yi}^1 = 0$, находят из этой системы уравнений магнитный курс Φ_{mi}^1 объекта 8. После этого для тех же самых угловых положений данного объекта определяют географический курс из выражения $\Phi_i^1 = \Phi_{mi}^1 + \Phi_c$, где Φ_c – магнитное склонение. Подставляя Φ_i^1 , Θ_i^1 , Ψ_i^1 , B_{xi}^1 , B_{yi}^1 , B_{zi}^1 в (7) – (9), вычисляют B_{xti} , B_{yti} , B_{zti} . По этим данным и измеренным B_{xi} , B_{yi} , B_{zi} , Φ_i , Θ_i , Ψ_i из (1) – (3) находят параметры Пуассона и B_{xp} , B_{yp} , B_{zp} . Следовательно, при известном Φ_c для определения B_{xti} , B_{yti} , B_{zti} от системы 7 достаточно иметь информацию об углах крена и тангажа.

Немагнитным объектом 8 может быть подвижный объект, аналогичный немагнитной шхуне «Заря» [7, 11]. Магнитометр 5 может быть размещен и на берегу, например, на контрольно-измерительном магнитном стенде. В этом случае наличие объекта 8 (рис. 1) не требуется. Однако, как и ранее, необходима реализация синхронной регистрации результатов измерений магнитной индукции магнитометрами 1 и 5, а также углов курса, крена и тангажа системой 3.

Немагнитный объект (устройство) может быть выполнен также и в виде затопляемого буя 1 (рис. 2), на котором размещены источник питания, трехкомпонентный магнитометр и регистрирующий блок. При этом магниточувствительный датчик магнитометра устанавливается на кардановом подвесе. Одна из осей датчика магнитометра ориентирована кардановым подвесом по вертикали, а две другие оси датчика взаимно ортогональны и размещаются в горизонтальной плоскости.

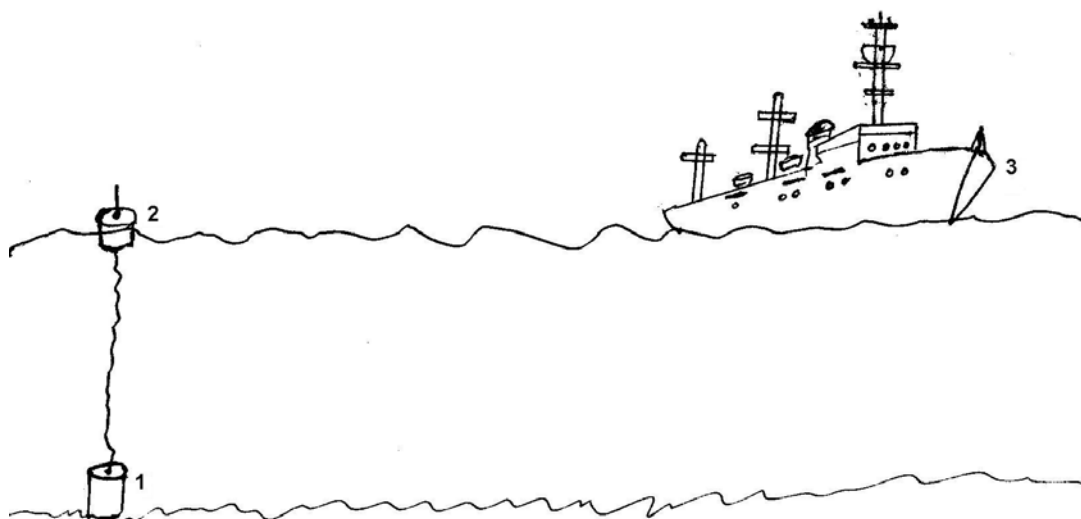


Рис. 2. Схема устройства на основе затопляемого буя, позволяющего повысить точность определения параметров Пуассона (пояснения в тексте)

Сигналы с выходов датчика, пропорциональные проекциям векторов индукции геомагнитного поля, запоминаются регистрирующим блоком с отметкой в определенные моменты времени.

Подвижный объект с затопляемым буюм выходит в заданный район акватории, где буй устанавливают на морское дно. Измерение проекций векторов индукции геомагнитного поля трехкомпонентным магнитометром, размещенным на затопленном бую, осуществляется автономно в определенные моменты времени. В эти же моменты времени измеряются проекции векторов намагниченности и на объекте 3 (рис. 2). Какая-либо связь затопленного буя с объектом отсутствует. Местоположение затопленного буя определяют с помощью связанного с ним плавающего немагнитного буя 2. Координаты плавающего буя при этом заносятся в вахтенный журнал.

По окончании измерений проекций векторов магнитной индукции затопляемым буюм и подвижным объектом при определенных шести его угловых положениях с отметкой в выбранные моменты времени оба буя поднимают на борт подвижного объекта, выбирают в равные или близкие моменты времени значения проекций векторов магнитной индукции с подвижного объекта и с затопляемого буя. По результатам выбранных

измерений по формулам (1) – (3), (7) – (9) определяют параметры Пуассона и проекции вектора магнитной индукции от жесткой намагниченности подвижного объекта в месте размещения магниточувствительного датчика магнитометра на подвижном объекте.

Таким образом, в рассмотренном решении учет влияния вариаций геомагнитного поля для каждого углового положения подвижного объекта снижает погрешности определения параметров Пуассона, характеризующих намагниченность подвижного объекта и позволяет оперативно контролировать их стабильность во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысенко А. П. Теория и методы компенсации магнитных помех. // Геофизическое приборостроение. – Л.: Мингеологии и охраны недр СССР, ОКБ. – 1960. – Вып. 7. – С. 44–58.
2. Резник Э. Е., Канторович В. А. Некоторые вопросы компенсации магнитных помех самолета // Геофизическое приборостроение. – Л.: Недра. – 1964. – Вып. 18. – С. 26–38.
3. Кожухов В. П., Воронов В. В., Григорьев В. В. Магнитные компасы. – М.: Транспорт, 1981. – 216 с.
4. Бледнов В. А. Основные принципы определения компонент магнитного поля Земли на движущихся ферромагнитных объектах // УФН, 1997. – Т. 167. – №10. – С. 1013–1018.
5. Смирнов Б. М. Определение индукции геомагнитного поля на фоне магнитных помех подвижного объекта // Измерительная техника. – 2003. – №11. – С. 52–58.
6. Гузев С. Т., Семевский Р. Б. Определение параметров Пуассона по измерениям магнитной индукции Т-магнитометром // Геофизическая аппаратура. – Л.: Недра. 1980. – Вып. 70. – С. 25–30.
7. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ. – 1978. – 592 с.
8. Логачев А. А., Захаров В. П. Магниторазведка. – Л.: Недра. – 1979. – 351 с.
9. Агеев М. Д. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. – 224 с.
10. Лейбов М. В. и др. Практические вопросы повышения точности морских магнитных съемок. М.: Изд-во МГУ. – 1986. – 142 с.
11. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат. – 1986. – 188 с.

On the Problem of Improving the Accuracy of Determining the Poisson Parameters that Characterize the Magnetization of a Movable Object

P. I. MALEYEV,
I. V. KAPUSTIN (GNINGI RF MoD),
B. M. SMIRNOV («Criomag» Ltd)

The solution of the problem intended to reduce the influence of geomagnetic field variations on the error in determining the Poisson parameters that characterize the magnetization of a movable object, is considered.

ГРНТИ 78.21.37.21

**СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОРСКОЙ
БОРТОВОЙ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

П. И. МАЛЕЕВ (ГНИНГИ МО РФ),
А. А. ХРЕБТОВ (ОАО НТП «Нави-Далс»),
В. И. ШЕРЕМЕТ (ООО «КРИОМАГ»)

В статье анализируются основные проблемы, стоящие на пути создания морских бортовых магнитометрических систем, возможности их преодоления, результаты создания и испытания макетных образцов таких систем, а также перспективы их использования.

Современное состояние развития магнитометрии и вычислительной техники открывает новые возможности в создании транспортабельных магнитометрических систем для ВМФ и народного хозяйства.

В настоящее время такие системы используются в ВМФ для измерения магнитного курса объекта (магнитные компасы), для съемки магнитного поля Земли (МПЗ) с целью составления карт МПЗ на акваториях, а также для защиты кораблей и судов от минного оружия, поиска затонувших объектов и «укрытия» подводных лодок в МПЗ.

При решении задачи определения магнитного курса маниточувствительные элементы (МЧЭ) компаса устанавливаются непосредственно на объекте. Точность магнитных компасов относительно невелика, поэтому они используются в основном в качестве аварийного средства. При решении ряда других задач (для исключения влияния магнитного поля самого объекта на измеряемое поле) МЧЭ приходится буксировать за объектом на расстоянии 100–200 м, что крайне ограничивает возможности использования магнитометрических систем. Кроме того, отечественные морские магнитометры в настоящее время практически отсутствуют. Они и ранее выпускались в единичных экземплярах, часто в виде макетных образцов, в настоящее же время на снабжении гидрографической службы ВМФ состоит единственный морской дифференциальный магнитометр МДМ. Однако он морально устарел по своей элементной базе, системе сбора и обработки информации и ряду других характеристик. Срок эксплуатации таких магнитометров, разработанных в 1984 г., истек в 2005 г.

С другой стороны, МПЗ подвержено вековым изменениям, которые достигают 100–120 нТл/год. За последние 150 лет магнитный полюс изменил свое положение на 1100 км. Вследствие этого, в частности, морские карты МПЗ должны обновляться каждые пять лет, что требует проведения систематических съемок этого поля на акваториях. Неэффективно решаются и другие задачи, связанные с магнитными полями на море. Отсутствие отечественных морских магнитометров вынуждает прибегать к использованию зарубежных.

Одним из важных недостатков существующих морских магнитометров (как отечественных, так и зарубежных) является то, что они могут использоваться только в буксируемом варианте. Один такой магнитометр обеспечивает магнитную съемку с погрешностью 10–15 нТл в средних широтах и 30–40 нТл – в высоких. При использовании двух разнесенных буксируемых магнитометров (градиентный метод) погрешность съемки снижается до 5–10 нТл во всех широтах. Погрешность определения МПЗ с карт составляет около 50 нТл, а градиентов – 10–20 нТл/км.

В последние годы в результате выполнения ряда научно-исследовательских работ в ГУНиО МО («Магнит», «Щит-АЕН», «Щецин-АЕН», «Маглаг»), разработаны, созданы и испытаны в стендовых (на метрологическом полигоне ВНИИМ им. Д. И. Менделеева) и морских условиях (на гидрографических судах) макетные образцы магнитометрических систем, способных работать непосредственно на борту корабля, судна или иного морского объекта [1–9]. В качестве чувствительного элемента в них использованы феррозонды, способные в отличие от существующих МЧЭ морских магнитометров измерять не модуль, а полный вектор магнитной индукции и три его составляющие. Чувствительность феррозондов составляет около 0,01 нТл, динамический диапазон – $\pm 2,10^5$ нТл, погрешность измерения – 0,02%. Они обладают высокой надежностью и устойчивостью к механическим и температурным воздействиям.

Наличие бортовых корабельных магнитометрических систем открывает широкие возможности их использования при решении ряда задач, актуальных для ВМФ и народного хозяйства, и прежде всего для обеспечения съемки МПЗ на морских акваториях. Однако создание таких систем оказалось весьма сложным, поскольку полезный сигнал должен измеряться на фоне постоянной составляющей МПЗ, достигающей 50000 нТл и его вариаций, достигающих десятков нТл. Кроме того, при качке объекта изменяется взаимное расположение вектора МПЗ и магнитных осей МЧЭ измерителя, что приводит к появлению помехи, изменяющейся с частотой качки. Амплитуда этой помехи при качке в 10° может достигать 15000 нТл. Подобные значения помех создает и собственная намагниченность самого объекта. Необходимо было найти способы, позволяющие снизить эти помехи до приемлемых величин.

В разработанных макетных образцах бортовых магнитометрических систем реализовано два метода борьбы с магнитными помехами: метод автоматической компенсации и метод расчетно-аналитический.

Первый состоит в том, что используются два идентичных феррозонда, каждый из которых помещен внутри трехкомпонентных катушек компенсации. Один из феррозондов является измерительным. Для уменьшения влияния магнитного поля, связанного с качкой объекта, он установлен в карданов подвес. Второй – компенсационный – устанавливается вблизи первого и жестко крепится к корпусу объекта. Такое размещение феррозондов при соответствующем количестве катушек компенсации и их

запиткой током позволяет обеспечить значительную компенсацию как постоянной намагниченности объекта (полукруговая девиация), так и индуктивной его намагниченности (четвертная девиация), а также компенсацию магнитных полей, создаваемых токами размагничивающих устройств (РУ) объекта. Компенсация осуществляется путем подачи тока с обратным знаком из катушек компенсационного датчика на катушки компенсации измерительного датчика. Данный метод борьбы с магнитными помехами впервые был реализован в электронном феррозондовом компасе КФ-1 [1].

В методе расчетно-аналитическом для уменьшения влияния магнитных помех объекта требуется информация о его угловых положениях (курс, крен, дифферент) в моменты измерения магнитных полей, источники которых расположены вне объекта. Эти данные необходимы при определении параметров Пуассона, характеризующих намагниченность объекта. К настоящему времени предложено несколько способов определения параметров Пуассона, однако их применение в реальных условиях встречает серьезные трудности. Нами разработаны и проверены новые, более простые и эффективные способы. В одном из них измерения магнитной индукции необходимо проводить синхронно при десяти разных [2], а в другом – при трех разных [3] угловых положениях объекта.

Расчетно-аналитический метод борьбы с магнитными помехами реализован в макетных образцах бортовых магнитометрических систем, работа которых экспериментально проверена. Он может быть использован в разных областях:

1) Для съемки МПЗ на акваториях, а также для выявления и исследования районов с аномальным МПЗ, связанным со значительными количествами ферромагнитных минералов в донных осадках акваторий. Известно, что большая часть градиентов МПЗ (примерно 90%) составляет 20 нТл/км, а в отдельных районах они достигают и 10–20 нТл/м.

Аномальные магнитные поля естественного происхождения могут создавать и сейсмоисточники, самыми активными из которых являются тектонические разломы в шельфовых зонах, на дне акваторий вблизи островных дуг и на участках палеорек [4, 5]. Диапазон частот, излучаемых этими источниками – от долей Гц до десятков МГц. Местоположение их относительно стабильно, что также может быть использовано при определении по ним местоположения объекта. Для решения этой задачи наибольший интерес представляет диапазон частот от 0 до 20 Гц. В магнитных единицах амплитуда сигнала в нескольких километрах от сейсмоисточника может достигать 15–50 нТл, а градиенты – до 0,3 нТл/м. По разным оценкам магнитный момент таких источников достигает 10^9 Ам² и более.

2) Для поиска затонувших объектов, а также определения местоположения своего объекта по искусственно создаваемым магнитным

реперам-ориентирам с известными координатами [6–8]. Отметим, что ферромагнитное тело объемом 1 см^3 изменяет градиент поля на расстоянии 1 м на 50 нТл/м. По экспериментальным данным от судна водоизмещением 15 тыс. тонн на расстоянии 200 м магнитный сигнал составил 150 нТл, что соответствует дипольному моменту порядка 10^6 Ам^2 . Магнитный момент корабля водоизмещением 20 тыс. тонн составляет около 10^7 Ам^2 , вертолета – около 500 Ам^2 .

3) Для измерения скорости объекта относительно Земли (абсолютной скорости) [9]. Разработанный макетный образец бортового магнитометрического лага работает на принципе транспортного запаздывания, когда при движении объекта два разнесенных по нему магниточувствительных датчика системы последовательно фиксируют одну и ту же аномалию магнитного поля.

Результаты испытаний созданных макетных образцов указывают на относительно высокую точность измерения рассматриваемыми системами модуля вектора индукции геомагнитного поля (менее 10 нТл.) Точность определения такой системой местоположения объекта в «магнитометрическом полигоне» (в зависимости от его качества) может достигать десятков метров. Для повышения точности измерения целесообразно использовать градиентный метод, размещая на определенном расстоянии один от другого (вдоль диаметральной плоскости объекта) два МЧЭ системы.

Погрешность измерения скорости магнитометрическим лагом в реальных морских условиях (на гидрографическом судне) при разнесении датчиков на 20 м оказалась сравнимой с погрешностью используемой на этом судне системой «Бриз», работающей по спутникам, и составила 0,08–0,5 узла при времени осреднения не более 20 с. При градиенте модуля МПЗ 0,1–0,12 нТл/м в районе испытания разность магнитной индукции между датчиками составила 2–2,5 нТл по модулю.

Как показали наши исследования, дальнейшее повышение точности бортовых магнитометрических систем может быть достигнуто путем:

- 1) уменьшения погрешности в определении углового положения объекта в моменты измерения магнитной индукции;
- 2) периодической коррекции параметров Пуассона объекта и проекций вектора магнитной индукции от жесткой его намагниченности непосредственно в процессе плавания объекта;
- 3) снижения влияния на измеряемое геомагнитное поле его вариаций и однородных промышленных помех.

Реализация первого направления возможна либо за счет применения на объекте высокоточной инерциальной навигационной системы, либо за счет разнесенных приемных антенн при использовании для измерения угловых положений объекта спутников. Так, например, норвежской фирме Seapath 400

еще в 1998 г. удалось снизить погрешности измерения угловых положений объекта по спутниковой навигационной системе до 3 угл. мин. [10].

Как было показано авторами [11, 12], также может быть решена и задача периодической коррекции параметров Пуассона объекта и проекций вектора магнитной индукции от жесткой его намагниченности в процессе плавания объекта.

В работе [11] эта задача решается по результатам измерения проекций векторов магнитной индукции двумя трехкомпонентными магнитометрическими датчиками при условии знания углов курса, крена, дифферента и отношения заранее определенных одноименных параметров Пуассона, не равных нулю, в местах размещения магнитометрических датчиков, а в статье [12] – и при отсутствии каких-либо сведений о геомагнитном поле и информации об угловых положениях объекта, а также при наличии не двух, а одного бортового трехкомпонентного магнитометрического датчика.

Способ реализации третьего направления повышения точности бортовых магнитометрических систем рассмотрен нами в работе [13]. Суть его сводится к периодическому использованию немагнитного затопляемого буя с трехкомпонентным магнитометрическим датчиком, регистрирующим блоком и источниками питания. При этом датчик установлен на кардановом подвесе. Одна из его осей ориентирована по вертикали, а две другие оси взаимно ортогональны и размещаются в горизонтальной плоскости. Какая-либо связь этого буя с объектом отсутствует. Местоположение его определяют с помощью связанного с ним плавающего на поверхности другого немагнитного буя и спутниковой навигационной системы. В результате совместной обработки одновременно полученных данных о магнитном поле, измеренном на объекте и затопленном бую, удается снизить влияние вариаций геомагнитного поля и однородных промышленных помех на параметры Пуассона.

Возможностям создания бортовых магнитометрических систем посвящен и ряд работ В. А. Бледнова [14 и др.].

На основе имеющихся результатов представляется целесообразным выполнить работу по созданию опытного образца бортовой магнитометрической системы, отвечающей (на первом этапе) требованиям по съемке МПЗ на морских акваториях, и провести его всесторонние испытания.

По результатам испытаний такой системы можно определить возможные пути создания и использования подобных магнитометрических систем для решения и других задач в интересах ВМФ и народного хозяйства, в частности, для:

- периодического уточнения местоположения и абсолютной скорости морских объектов по МПЗ;
- поддержания с помощью РУ намагниченности морского объекта на уровне МПЗ в любом районе акватории;

- обнаружения и определения относительных координат и скорости, приближающихся к объекту других подвижных морских объектов;
- поиска и обследования затонувших объектов, мин и т. п.;
- обнаружения и картирования трасс силовых кабелей и нефтегазовых трубопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидаспов Д. Д., Кошкарев В. Н., Малеев П. И. и др. Электронный компас ферромагнитный типа КФ-1 // Труды 4-й Российской н.-техн. конференции «Современное состояние, проблемы навигации океанографии» («НО-2001»), СПб. 6–7 июня 2001 г. – Т. 1. – СПб, 2001. – С. 135–138.
2. Малеев П. И., Смирнов Б. М. Новые методы определения составляющих вектора индукции МПЗ с ферромагнитных объектов // Навигация и гидрография. – 1999. – №8. – С. 82–86.
3. Малеев П. И., Смирнов Б. М., Шеремет В. И. К вопросу определения индукции геомагнитного поля с подвижного ферромагнитного объекта // Навигация и гидрография. – 2001. – №13. – С. 114–117.
4. Малеев П. И., Наумов А. П. Электромагнитные сигналы сейсмоисточников как естественные навигационные ориентиры // Навигация и гидрография. – 1999. – №8. – С. 79–82
5. Малеев П. И., Наумов А. П., Шеремет В. И. Естественные магнитные сигналы сейсмоисточников морского шельфа и особенности их приема // Навигация и гидрография. – 2001. – №13. – С. 110–114.
6. Малеев П. И., Гидаспов Д. Д., Шеремет В. И. Топография магнитных реперов различной формы и протяженности // Навигация и гидрография. – 1997. – №5. – С. 53–56.
7. Малеев П. И., Смирнов Б. М., Хасиев И. С. Определение местоположения подвижного объекта по магнитному реперу // Навигация и гидрография. – 1998. – №. 8. – С. 75–80.
8. Малеев П. И., Гидаспов Д. Д. Результаты испытаний макетного образца бортовой магнитометрической системы по определению местоположения объекта относительно магнитного репера // Труды 4-й Российской н.-техн. конференции «Современное состояние, проблемы навигации океанографии» («НО-2001»), СПб. 6–7 июня 2001 г. – Т. 2. – СПб, 2001. – С. 149–152.
9. Малеев П. И., Капустин И. В., Конеченков Е. А., Гидаспов Д. Д., Шеремет В. И. Бортовая магнитометрическая система определения абсолютной скорости. Результаты разработки и испытаний макетного образца // Записки по гидрографии. – 2005. – Вып. 263. – С. 13–18.
10. Информационный проспект фирмы Seatex, Норвегия. – 1998.
11. Малеев П. И., Смирнов Б. М. Корректировка параметров Пуассона и проекций вектора магнитной индукции от постоянной намагниченности подвижного ферромагнитного объекта // Навигация и гидрография. – 2004. – №19. – С. 70–73.
12. Малеев П. И., Смирнов Б. М. К вопросу повышения точности определения местоположения морского подвижного объекта по магнитному реперу с известными координатами // Навигация и гидрография. – 2006. – №22. С. 21–30.
13. Капустин И. В., Малеев П. И., Смирнов Б. М. К вопросу повышения точности определения параметров Пуассона, характеризующих намагниченность подвижного объекта // Навигация и гидрография. – 2006. – №23. – С. 82–87
14. Бледнов В. А. Основные принципы определения компонент магнитного поля Земли на движущихся ферромагнитных носителях // УФН. – 1997. –Т. 167. –№.10. – С. 1113–1118.

The State of Development and Prospects for Employment of the Marine Shipborne Magnetometric System

P. I. MALEYEV (GNINGI RF MoD),
A. A. KHREBTOV («NTP “Navi-Dals”»),
V. I. SHEREMET («Criomag» Ltd)

The main problems on the way of creating the marine shipborne magnetometric systems, the possibilities of their solution, the results of creating and testing the mock-up models of such systems, as well as the prospects for their employment, are analysed.

**К ВОПРОСУ О НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТАХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ
ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ****Ю. Г. ФИРСОВ**

(Государственная Морская Академия им. адм. С. О. Макарова)

В статье рассматривается развитие Стандартов на гидрографические съемки Международной гидрографической организации (ИНО Standards for Hydrographic Survey. Special Publication S-44). Детально анализируются требования четвертой редакции Стандарта (1998), проводится сопоставление с Инструкцией по гидрографической съемке корпуса инженеров армии США (EM 1110-2-1003, US ACE, 2001). В этой связи рассматривается отечественный нормативный документ Правила Гидрографической службы №4, часть 2 (1984), а также вновь изданные ведомственные инструкции: «Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним» и «Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства», СП-11-104-94, Часть III, 2004 г.

Отличительной особенностью современной гидрографии является ее международный характер, что связано с необходимостью создания различными государствами равноценных по точности и надежности морских карт. Стремительное развитие средств и методов современной гидрографии и внедрение в практику современного мореплавания морских электронных карт настоятельно ставят вопросы унификации требований при проведении гидрографических съемок.

В 1912 г. в Санкт-Петербурге состоялась первая Международная морская конференция, на которой впервые было предложено создать Международное Гидрографическое Бюро, а на Международном Гидрографическом съезде в 1919 г. в Лондоне, был внесен проект о его создании. Международное Гидрографическое Бюро было основано в 1921 г., и одной из провозглашенных целей его деятельности уже тогда было «поощрение принятия наилучших способов гидрографических съемок».

В сентябре 1970 г. Международное Гидрографическое Бюро было преобразовано в Международную Гидрографическую организацию (МГО), членом которой Россия является с 1977 г. Новая организация среди прочих задач провозгласила координацию деятельности национальных гидрографических служб и принятие надежных и эффективных методов проведения гидрографических съемок.

«Стандарт МГО на гидрографические съемки» (ИНО Standards for Hydrographic Survey) выходит в виде специальной публикации МГО № 44 (Special Publication 44), более известной как документ S-44. Первое издание Стандарта было опубликовано в еще 1968 г. с последующими переизданиями в 1982 и 1987 гг. (вторая и третья редакции). Необходимо отметить, что

стандарты рассматриваются исключительно как добровольные документы, дающие общие рекомендации и определяющие минимальные требования к качеству проведения гидрографических съемок для стран-членов МГО, а также других стран, выполняющих данные работы в зонах своей ответственности. Предполагалось, что на основе стандартов МГО страны-члены МГО будут разрабатывать свои национальные стандарты выполнения гидрографических съемок, учитывающие специфические особенности акваторий и исторически сложившиеся методические особенности выполнения работ.

Первые три редакции документа S-44 идеологически были во многом схожи, поскольку касались выполнения гидрографических съемок, направленных на создание морских навигационных карт. При этом масштабы съемок увязывались с текущими потребностями судоходства, глубинами моря на основных судоходных трассах, а также доступными в то время средствами высокоточного определения координат при проведении гидрографических работ.

В предыдущем издании Стандарта S-44 (1987 г.) основное внимание было сосредоточено на классификации точностей для гидрографических съемок, проводимых для составления морских навигационных карт. В настоящее время стало понятно, что пользователи гидрографических данных представляют куда более разнообразную по своему составу группу, чем казалось ранее.

На новом этапе научно-технического прогресса в области морской навигации и гидрографии в начале 90-х годов возникла необходимость создания очередной, четвертой редакции Стандарта S-44. Для этого в 1993 г. была создана рабочая группа из представителей тринадцати государств-членов МГО. Группе было поручено дать рекомендации для формирования новой редакции, учитывающей развитие спутниковых средств определения местоположения (Навстар и ГЛОНАСС), прогресса в создании мелководных многолучевых эхолотов и их широкое внедрением в практику гидрографических работ, а также появление мощных и недорогих компьютеров. В связи с этим в новом Стандарте (четвертая редакция, 1998 г.) основной упор сделан на оценку точности данных, получаемых в результате гидрографических работ, а также предоставления потенциальным пользователям метаданных, касающихся дополнительной разносторонней информации, позволяющей впоследствии использовать материалы промера для других целей.

Главным нововведениями четвертой редакции являются:

- обоснование *категорий* (orders) гидрографической съемки (четыре категории);
- введение понятия суммарной перенесенной ошибки (Total Propagated Error=ТРЕ); Стандарт впервые поставил вопрос о том, что с помощью суммарной перенесенной ошибки (СПО) необходимо характеризовать

положение глубины на дне с учетом всех составляющих ошибок, учитывая также и размер следа луча эхолота на дне;

- рекомендации по регистрации не только результатов промера, но и оценки точности получаемых величин на уровне 95% доверительной вероятности;
- введение принципа 100%-го обследования дна;
- ведение понятия «обнаружения объектов на дне».

Главным отличием четвертой редакции Стандарта является введение категорий гидрографических съемок в зависимости от важности района их проведения для безопасности надводного мореплавания. В зависимости от категории съемки назначается точность определения планового положения глубины на морском дне и точность исправленной глубины. При этом в отличие от прошлых редакций Стандарта полностью отказываются от зависимости между точностью гидрографических измерений и масштабом съемки. Все гидрографические съемки разделены на четыре категории в соответствии с предполагаемыми пользователями получаемой информации.

В табл. 1, где в сжатой форме представлена суть четвертой редакции Стандарта, приведены основные требования по точностным характеристикам четырех нормированных категорий гидрографической съемки.

Специальная или нулевая категория (Special Order) – специальные наиболее опасные для судоходства акватории, где глубина под килем проходящих судов минимальна, а характеристики грунта наиболее опасны в случае касания дна. Эти районы национальная гидрографическая служба, ответственная за гидрографическое обеспечение, определяет самостоятельно. Как правило, глубины на таких акваториях не должны превосходить 40 м (максимально возможная осадка современных судов).

Первая категория (Order 1) – для портов, подходных каналов, рекомендованных путей, прибрежных районов с интенсивным движением судов на акваториях с глубинами менее 100 м.

Вторая категория (Order 2) – акватории с глубинами менее 200 м, не охваченные категориями 1 и 0.

Третья категория (Order 3) – акватории с глубинами более 200 м, не охваченные категориями 2, 1 и 0.

Четвертая редакция Стандарта S-44 определяет для каждой из указанных категорий: точность планового положения (на уровне 95% доверительной вероятности); точности глубин (на уровне 95% доверительной вероятности); требования 100%-го обследования дна; способность системы съемки по обнаружению подводных объектов потенциально опасных для навигации (экзогенных и техногенных), а также максимальную подробность промера.

Неопределенность измерения глубины разделена на две составляющие: постоянную и переменную (зависящую от глубины). Точность глубины следует понимать как точность глубины, исправленной всеми поправками. Все источники ошибок должны быть изучены, определены поправки,

исключающие систематические ошибки, а точность полученных поправок должна быть учтена при получении СПО (ТРЕ).

Таблица 1

Резюме минимальных стандартов на гидрографические съемки

Категория	Особая	1	2	3
Примеры типичных районов	Гавани, места стоянок судов и связанные с ними важнейшие фарватеры с минимальными безопасными расстояниями	Гавани, фарватеры на подходах к гаваням, рекомендованные пути и некоторые прибрежные районы с глубинами до 100 м	Районы, не описанные в особой категории и категории 1, или районы с глубинами до 200 м	Морские районы, не описанные в особой категории, или районы с категориями 1 и 2
Точность плановой привязки (95% доверительной вероятности)	2 м	5 м + 5% глубины	20 м + 5% глубины	150 м + 5% глубины
Точность исправленных глубин 95% доверительной вероятности ¹⁾	a = 0,25 м b = 0,0075	a = 0,5 м b = 0,013	a = 1,0 м b = 0,023	Та же, что и для категории 2
100%-е обследование дна	Обязательно ²⁾	Требуется в отдельных районах ²⁾	Возможно, требуется в отдельных районах	Не применяется
Способность системы обнаруживать препятствие	Кубические объекты > 1 м	Кубические объекты > 2 м на глубинах до 40 м; 10% глубины на глубинах больше 40 м. ³⁾	Та же, что и для категории 1	Не применяется
Максимальное междугалсовое расстояние ⁴⁾	Не применяется, обязательно 100%-ое обследование	Три средних глубины или 25 м в зависимости от того, что больше	Три – четыре средних глубины или 200 м в зависимости от того, что больше	Четыре средних глубины

Примечания.

¹⁾ Для вычисления предельных погрешностей для точностей глубин соответствующие значения *a* и *b*, перечисленные в таблице, должны быть введены в формулу

$$[a^2 + (b \times d)^2]^{1/2},$$

где *a* – константа погрешности глубины, т. е. сумма всех постоянных погрешностей; *b* × *d* – погрешность, зависящая от глубины, т. е. сумма всех зависимых от глубины погрешностей; *b* – коэффициент зависимости погрешности от глубины, *d* – глубина.

2) Для целей безопасности мореплавания, для съемок Особой категории и Категории 1 может считаться достаточным использование точно определенного механического трала, чтобы гарантировать минимальную безопасную глубину под килем на протяжении всего района.

3) Значение, равное 40 м, выбрано с учетом максимальной ожидаемой осадки судов.

4) Междугалсовое расстояние может быть увеличено, если используются процедуры обеспечения надлежащей плотности съемки.

Графическое представление допустимых точностей глубин, по стандарту ИНО S-44/4 для разных категорий съемки представлено на рис. 1.

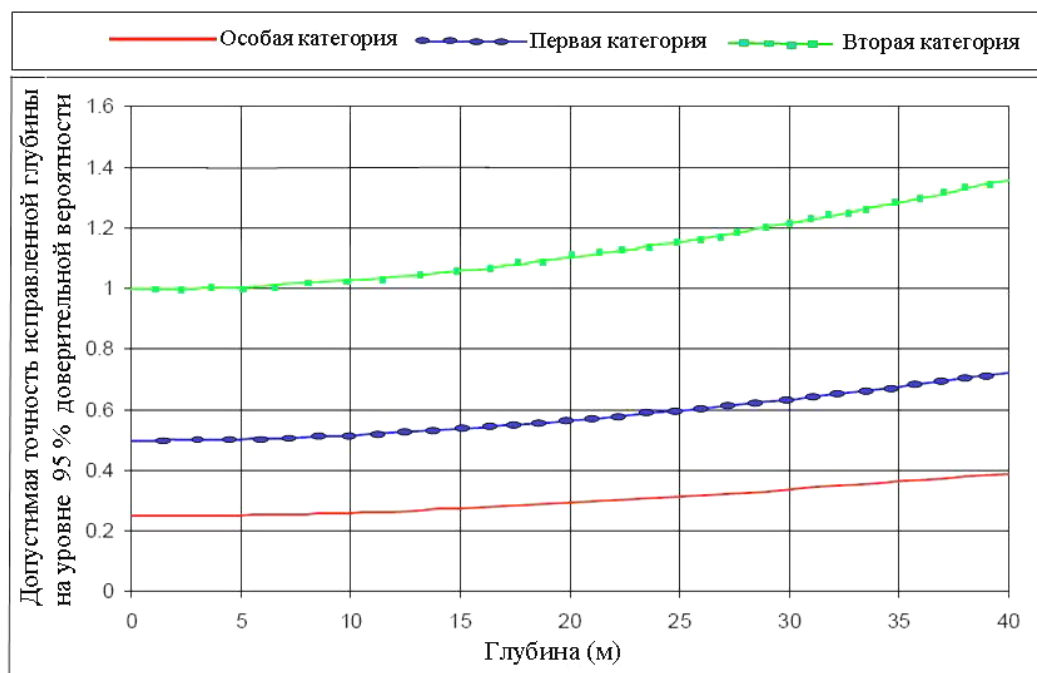


Рис. 1. Графическое представление допустимых точностей глубин по Стандарту ИНО S-44

На основе S-44/4 национальные гидрографические организации разрабатывают собственные стандарты. В настоящее время известны следующие документы:

- NOS Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables. NOAA (USA) 2003;
- EM 1110-2-1003 US Army Corps of Engineers, 2002;
- Standards for Hydrographic Surveys (HYSPEC), LINZ (New Zealand), 2001;
- Danish national charting Standards, 2002;
- Canadian Standards for Hydrographic Surveys, 2003;
- S 003, The International Marine Contractors Association (IMCA), 2001.

В процессе подготовки находится национальный Стандарт на выполнения гидрографических работ Финляндии.

Наибольший интерес для современной отечественной гидрографической практики представляет Стандарт EM 1110-2-1003 – инструкция по гидрографической съемке, подготовленная корпусом инженеров армии США (US Army Corps of Engineers – USACE). В США гидрографы, выполняющие работы на внутренних водных путях, в портах и мелководных прибрежных акваториях, а также работы для обеспечения дноуглубления, пользуются нормами по точности, приводимыми в главе 3 этого документа.

На рис.2 представлены графики, суммирующие минимальные точностные требования документов S-44/4 и EM 1110-2-1003, удобные для обсуждения вопроса определения ошибок глубин. В табл.2 представлены минимальные стандарты для трех категорий гидрографической съемки в соответствии с Инструкцией USACE. Эта таблица, составленная на основе таблицы 3-1, взятой из инструкции EM 1110-2-1003, немного изменена, для того чтобы было удобнее выполнять сравнение с требованиями Стандарта S-44.

Стандарт гидрографической съемки USACE в части требований к точности глубин в значительной степени повторяет Стандарт ИЮ. Действительно, требования по точности исправленных глубин для категории «твердый грунт» (Hard Bottom) в стандарте USACE приблизительно соответствуют «особой категории» съемки стандарта S-44/4, а категория «мягкий грунт» (Soft Bottom) – соответствует первой категории Стандарта «S-44/4».

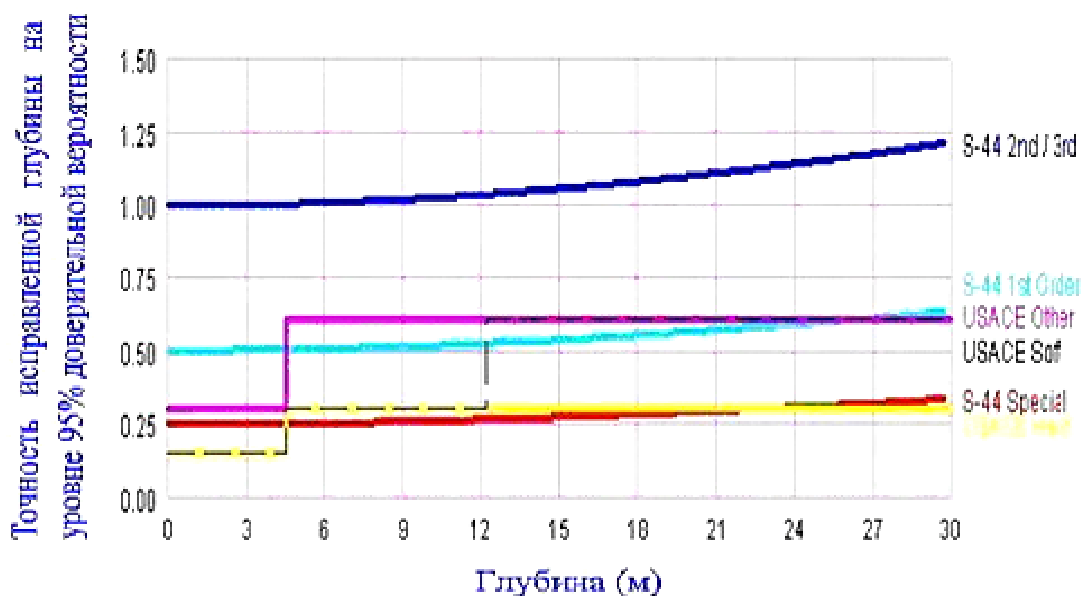


Рис. 2. Сравнение графиков распределения точностей исправленных глубин (на уровне 95% доверительной вероятности) в зависимости от глубины для стандартов ИЮ и USACE

В отличие от морской гидрографии корпус инженеров не проводит съемки на глубинах более 25 м, поэтому графики на рис. 2 ограничены глубиной 30 м. Из рис. 2 видно, что Стандарт S-44 создает плавные кривые точностей исправленных глубин, в то время как в соответствии со Стандартом EM1110-2-1003 эти кривые имеют ступенчатую форму. При сравнении минимальных требований для съемок «особой» категории (S-44) со съемками на «твердом грунте» (EM1110-2-1003) заметно, что точностные требования USACE для малых глубин более высокие. Графики показывают, что требования USACE к точности глубин на «твердом» и «мягком» грунте хорошо коррелируют с требованиями МГО для «особой» и первой категории съемок соответственно.

Съемки, относящиеся к категории «другие съемки не для навигационных нужд» (Other Non-Navigation Surveys), выполняются в основном для целей инженерного изучения акваторий, таких как съемка водохранилищ, прибрежных зон, изучение подводной части гидроузлов и т. д. Инструкция USACE представляет собой важный и нужный для каждого гидрографа документ, регламентирующий проведение всех указанных видов съемок.

Таблица 2

Резюме минимальных стандартов на гидрографические съемки по USACE

Классификация съемки	Съемки для обеспечения безопасности мореплавания и выполнения дноуглубительных работ		Другие съемки не для навигационных нужд (Other Non-Navigation Surveys)
	Твердый грунт (Hard Bottom)	Мягкий грунт (Soft Bottom)	
Точность плановой привязки на уровне 95% доверительной вероятности (м)	<2	2	5
Результирующая точность глубины (D) на уровне 95% доверительной вероятности (м)	$D < 4.6 \pm 0,15$ $4.6 < D < 12,2 \pm 0,3$ $D > 12,2 \pm 0,3$	$D < 4.6 \pm 0,15$ $4,6 < D < 12,2 \pm 0,3$ $D > 40' \pm 0,6$	$D < 4.6 \pm 0,3$ $4.6 < D < 12.2 \pm 0,6$ $D > 12.2 \pm 0,6$
100%-ое обследование дна	Требуется	Не требуется	Не требуется
Способность системы обнаруживать объекты: - минимальный размер объекта; - минимальное количество акустических контактов	Объект в виде куба с ребром 0,5 м и три акустических контакта	Объект в виде куба с ребром 1 м и три акустических контакта	Не применяется
Минимальная подробность промера	Не применяется, 100%-ое механическое или акустическое обследование дна обязательно	Не должна превосходить 61 м. (200 футов)	Не должна превосходить 152 м (500 футов)

В настоящее время отечественная гидрография в части съемки рельефа дна располагает следующими нормативными документами:

- Правила Гидрографической службы №4, часть 2, издание ГУНиО МО, 1984;
- «Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним» (РД31.74.04-2002);
- Инженерно-геодезические изыскания при строительстве: СП-11-104-94, Часть III, «Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства», издание 2004 г.

Правила Гидрографической службы (ПГС) №4, часть 2, являются прекрасно отработанным документом, на котором было воспитано целое поколение отечественных гидрографов. В этом документе научно обоснованы такие характеристики, как подробность промера, требуемые точности определения координат и глубин, полевой контроль выполнения съемки и методы расчета окончательной точности глубин применительно к однолучевым эхолотам. Для выполнения и ручной обработки промера с аналоговым однолучевым эхолотом этот документ и теперь не потерял свое значение. Однако в настоящее время в связи с внедрением в практику цифровых эхолотов, эхотралов, многолучевых эхолотов и ГБО, а также навигационных спутниковых и геоинформационных технологий данный документ безнадежно устарел и требует коренной переработки.

«Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним» (РД31.74.04-2002) является ведомственной инструкцией Министерства транспорта. Этот документ, введенный в действие постановлением Технического комитета МОРФЛОТ №16 от 17.06.2004, должен *«устанавливать организационно-технические нормы, технологические способы, методы производства промера, нормативные требования по точности и срокам его выполнения при производстве дноуглубительных работ и контроле габаритов морских каналов, фарватеров и акваторий портов»*. К сожалению, приходится констатировать, что в современных условиях РД31.74.04-2002 не способен в полной мере выполнить возлагаемые на него функции. В этой Инструкции отсутствуют требования к точности получаемых глубин, а требуемые точности определения планового положения опять увязаны с масштабами выполняемых съемок. Оценка точности, вопреки сложившейся международной гидрографической практике, основывается на среднеквадратических погрешностях (с 68% доверительной вероятности). За основу взят предыдущий вариант документа – РД31.74.04-79 и выполнена его доработка, которой совершено недостаточно. Технологии гидрографии изменились радикально, и это обстоятельство требует создания принципиально нового нормативного документа. Такой документ должен отражать концепции

электронной гидрографии, основанные на спутниковых и геоинформационных технологиях взамен визуальных способов определения координат и ручных методов обработки материалов. В Инструкции только упоминаются DGPS, RTK – спутниковые методы, но не дается никаких указаний по их применению. Основное же внимание по-прежнему уделено визуальным методам, которые на практике уже не используются. Упоминание многолучевой съемки носит описательный характер и также не содержит конкретных рекомендаций и норм, которыми могли бы руководствоваться операторы гидрографических комплексов на базе многолучевых эхолотов. Такие средства, как эхотралы, ГБО и батиметрические гидролокаторы вообще не упоминаются.

В Инструкции не уделено должного внимания процедурам контроля качества выполнения промерных работ. Единственное упоминание о контроле качества (ст.2.2.6) сводится к требованию сличения глубин в точках пересечения основных и контрольных галсов. При этом выдвигается требование: *«85% случаев сличения расхождения глубин на контрольных и основных галсах в диапазоне 0-20 м не должно превышать 5% от глубины»*. Данное требование соответствует аналогичным требованиям ПГС №4 для нерасчлененного рельефа на шельфе ($\delta_{сл}$, % = 5,1, m_{zo} , %=2,4), однако оно в 2 раза ниже аналогичных требований Стандарта S-44/4 (1998) для особой категории. При допустимой СКП исправленной глубины в 2,4 % для глубины 10 м имеем 0,24 м (68%), в то время как для особой категории Стандарта S-44/4 (1998):

$$[a^2 + (b \times d)^2]^{1/2} = [0,25^2 + (10 \times 0,0075)^2]^{1/2} = 0,24 \text{ м (95\%)}$$

По требованиям USACE (EM1110-2-1003) допустимая точность составляет 0,30 м. (95%).

Для первой категории Стандарта S-44/4 (1998) допустимая точность измерения глубины составляет $[a^2 + (b \times d)^2]^{1/2} = [0,5^2 + (10 \times 0,013)^2]^{1/2} = 0,52 \text{ м (95\%)}$, а по требованиям USACE - EM1110-2-1003 – 0,30 м (95%).

Учитывая соотношение мер точности с доверительными вероятностями σ (95%) = 1,94 σ (68%) можно утверждать, что требования по допустимой точности определения глубин по Инструкции РД31.74.04-2002 в два раза хуже, чем аналогичные требования USACE.

Одним из главных недостатков новой Инструкции является полное игнорирование новейших достижений морской геоматики. Недооценена роль современных цифровых гидролокаторов бокового обзора, батиметрических гидролокаторов и функция ГБО многолучевых эхолотов. Вместе с тем зарубежная практика ясно показывает, что это не только очевидная замена такого дорогого и сложного вида работ, как гидрографическое траление (функция обнаружения препятствий), но и огромный резерв для развития дистанционных методов изучения площадного распределения и анализа

верхнего слоя донных осадков. В Инструкции ничего не сказано и об использовании средств и методов аэросъемки и дистанционного зондирования для гидрографического изучения мелководных акваторий. Морская электронная картография также полностью осталась за ее рамками. В век электронных карт одним из основных вариантов представления результатов промера является его прямая конвертация в обменный формат S-57. Это чрезвычайно актуально для прибрежных акваторий с высокой динамикой рельефа, особенно в районах интенсивного мореплавания, а также на акваториях дноуглубления и гидротехнического строительства.

По нашему мнению, Инструкция РД31.74.04-2002 не соответствует реалиям современной электронной гидрографии, обозначенным в международных Стандартах, и не несет полезной методической и технологической информации, так необходимой гидрографам-практикам.

Нормативный документ *«Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства»*, (СП-11-104-94, Часть III), издание 2004 г. по сути своей очень напоминает РД31.74.04-2002 и не вносит ничего нового в вопросы проведения промерных работ с использованием новых гидрографических технологий.

На основе выполненного анализа международных и отечественных нормативных документов, регламентирующих выполнение гидрографических работ в прибрежной зоне, можно утверждать:

- отечественные нормативные документы не в полной мере отражают технологические возможности современной гидрографии и не соответствуют международным требованиям;
- отсутствуют нормы и требования по использованию многолучевых эхолотов, гидролокаторов бокового обзора, батиметрических гидролокаторов и эхотралов;
- отсутствуют критерии качества выполняемых промерных работ, а точности промера в наиболее ответственных районах допускается вдвое ниже принятой за рубежом;
- в документах не обобщен опыт эксплуатации электронных гидрографических информационных систем, которые широко практически используются для выполнения всех этапов работ.

В заключение следует подчеркнуть, что создание нормативных документов является трудной, но важной задачей. В настоящее время создание нового отечественного нормативного документа, касающегося выполнения гидрографических съемок является насущной необходимостью. Эту работу следует поручить Главному управлению навигации и океанографии МО РФ с широким привлечением специалистов Федерального агентства по морскому и речному транспорту на основе создания рабочей группы из специалистов, объединяющих гидрографов-практиков, сотрудников высших учебных заведений, а также заинтересованных представителей коммерческих структур.

В настоящее время в МГО создается рабочая группа по подготовке 5-ой редакции Стандарта S-44, в связи с чем выход в свет нового отечественного стандарта по гидрографическим съемкам целесообразно осуществить после принятия последнего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркин Н. Н. Краткий исторический очерк развития гидрографии. Л: Военмориздат, 1940. – 108 с.
2. IHO Standards for Hydrographic Survey. Special Publication S-44, 1998. – 23 p.
3. EM 1110-2-1003, US ACE, 2001. Chapter 3. – 16 p.
4. Правила Гидрографической службы №4. Часть 2. Л.: ГУ Н и О МО, 1984. – 264 с.
5. Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним. РД31.74.04-2002. – Ростов-на-Дону, 2004. – 155 с.
6. СП-11-104-97. «Инженерно-геодезические изыскания для строительства». Часть III. «Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства» / Госстрой России. – М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ФГУП «ПНИИИС») Госстроя России, 2004. – 105 с.

On the Normative Documents for Hydrographic Survey

Y. G. FIRSOV

(Makarov State Maritime Academy)

The evolution of the IHO Standarts for hydrographic surveys (IHO Standarts for Hydrographic Survey, Special Publication S-44) is considered. The requirements of the Standard, Version 4, are analysed in detail. The comparison is made with Instruction for the Hydrographic survey of the US Army Corps of Engineers (EM 1110-2-1003, US ACE, 2001). In this connection, the following national documents are considered Regulations of the Hydrographic Office No. 4, part 2 (1984) and the newly issued departmental instructions «Technology of hydrographic surveys in dredging operations and in depth control for navigation safety in the sea ports and at the approaches to them» and «Engineering-hydrographic surveys in engineering explorations for construction work» (СП-11-104-94, Part III, 2004)

ГРНТИ 78.25.25.31.39.29

**О ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО ТРАЛЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИМИ ТРАЛАМИ**

В. Н. ГОРШКОВ
(ГНИНГИ МО РФ)

Проанализированы причины погрешности при тралении механическими тралами. Даны рекомендации по тарированию тралов. Их использование позволяет уменьшить принимаемую при работах среднюю квадратическую погрешность удержания трала на заданной глубине.

В настоящее время, несмотря на наличие в Гидрографической службе ВМФ эхотралов и эхографов, в отдельных случаях применяется такой вид обследований акваторий, как гидрографическое траление простыми в изготовлении и обслуживании механическими тралами (трал Котельникова, трал гидрографический полужесткий). Они тралы применяются тогда, когда разрешающей способности акустических средств становится недостаточно для обнаружения подводных навигационных опасностей точечного характера, например, свай, «топляков», мелких металлических и бетонных конструкций и т. д. [1].

Наиболее часто применяются тралы системы Котельникова различных модификаций. В соответствии с Правилами гидрографической службы [2, № 6, часть 1] средняя квадратическая погрешность удержания этого трала на заданной глубине t , обусловленная его тактическими свойствами, составляет $\pm 0,15$ м. В соответствии с «Инструкцией по тралению» (ИТ-74) в глубину траления вводится поправка за точность удержания глубины тралом, равная $2t$, т. е. 0,3 м. Данная величина неоднократно вызывала сомнение у организаций, заказывающих траление, особенно при выполнении его для определения объема дноуглубительных работ или контроля за ними. В некоторых случаях эта величина не учитывалась. Так, в «Положении о навигационно-гидрографическом обеспечении плавания судов по Продольному Лоцманскому каналу...», согласованном с начальником ГУНиО МО 28 апреля 1973 г., в п. 21 §3 разрешается гарантированный запас 0,3 м не учитывать. Как показало рассмотрение руководящих документов [2–4] и «Записок по гидрографии» за 1948–1999 гг., величина инструментальной погрешности трала принята без обоснования. Так же необоснованно разрешается ее и не учитывать в вышеприведенном «Положении...». Анализ возможных причин возникновения погрешности удержания трала на заданной глубине показывает, что при точной установке трала и разметке по его футшточной части эта погрешность определяется действием встречного

потока воды, вызванного ходом судна с тралом. Этот встречный поток вызывает отклонение тралящей части в корму судна и ухода ее с заданного горизонта траления (рис. 1).

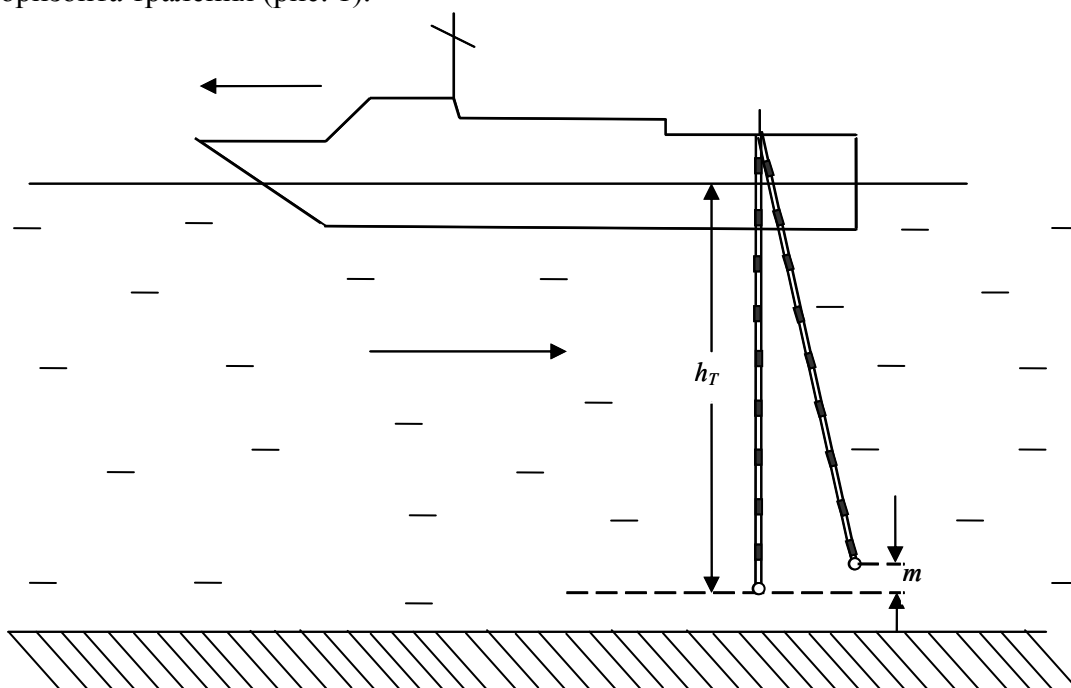


Рис. 1 Схема трала системы Котельникова (вид сбоку). Объяснения в тексте

Рассчитаем величины m при отклонении боковых футштоков трала на различные углы θ , при глубинах: 5,45; 6; 7; 8; 9 и 10 м по формуле

$$m = h_T - S_m \theta \operatorname{ctg} \left(90 - \frac{\theta}{2} \right).$$

Полученные величины сведены в таблицу.

Зависимость погрешности удержания тралов на заданной глубине от отклонения боковых футштоков трала и заглубления тральной части

θ , град	$h=5,45$ м		$h=6$ м		$h=7$ м		$h=8$ м		$h=9$ м		$h=10$ м	
	m	$2m$	m	$2m$	m	$2m$	m	$2m$	m	$2m$	m	$2m$
5	0,02	0,04	0,02	0,04	0,03	0,06	0,03	0,06	0,03	0,06	0,04	0,08
10	0,08	0,16	0,09	0,18	0,11	0,22	0,12	0,24	0,14	0,28	0,15	0,30
15	0,19	0,38	0,20	0,40	0,24	0,48	0,27	0,54	0,31	0,62	0,34	0,68

В натуральных условиях погрешность m может быть еще больше, т. к. боковые трубы-футштоки трала будут еще и изгибаться в зависимости от материала, из которого они изготовлены. Замерить точно эти отклонения невозможно. Однако видно, что величина $m_{ТС}$, особенно для малых глубин и при малых углах отклонения (до 10°), явно завышена.

С целью уменьшения принятой в ИТ-74 величины СКП удержания механических тралов на заданной глубине предлагается трал тарировать, что позволит исключить или уменьшить влияние целого ряда систематических погрешностей.

Общий вид предлагаемого тарирующего устройства приведен на рис. 2.

В качестве тарирующего устройства предлагается использовать вежу, состоящую из пенопластового поплавка (1), тонкого стального отмаркированного троса (2), якоря (3) и «ежика» (мерного отрезка) (4). «Ежик» – это тонкий металлический стержень длиной 60-70 см, на котором через 5 см крестообразно расположены алюминиевые проволочки длиной примерно по 5 см.

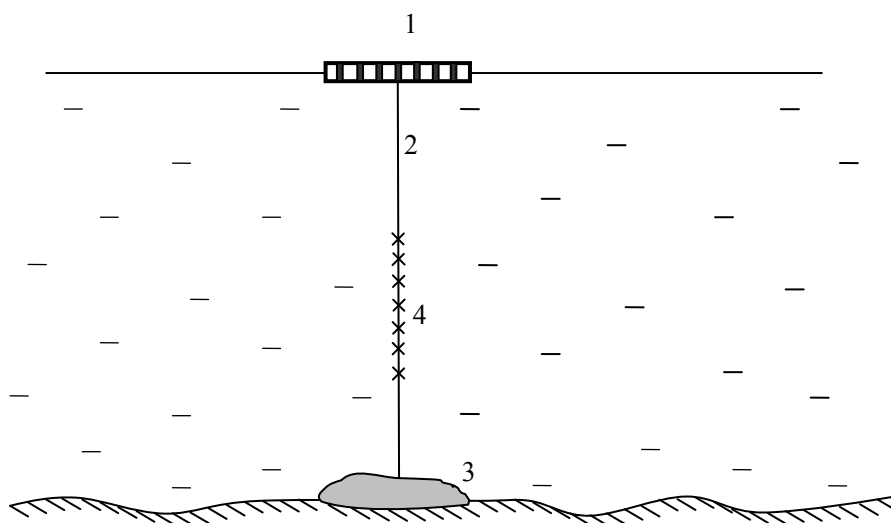


Рис. 2. Тарирующее устройство. Объяснения в тексте

Тарирование производится следующим образом. При заданном горизонте траления, например, 5 м вежа устанавливается втугую в районе предстоящего траления на глубине около 7 м на ровном плотном грунте.

«Ежик» крепится на тросе вежи так, что его середина находится на горизонте траления. Трал тарируется на двух взаимно параллельных галсах, расположенных параллельно намеченным тральным галсам, на скорости, с которой будет производиться траление. За поправку тарирования принимается наибольшая из двух величин, полученных в результате тарирования, на которую трал и опускается, причем отсчетной считается ближайшая нижняя непогнутая крестовина «ежика». Учитывая, что цена деления тарирующего

устройства 5 см, трал пускается еще на 10 см (вместо 30 м в соответствии с ИТ-74).

Рассмотренное тарирующее устройство использовалось для определения СКП удержания трала на заданной глубине при проведении испытаний и приемке на снабжение трала гидрографического полужесткого [5].

Предложенная методика повышает достоверность результатов траления механическими гидрографическими тралами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А. С., Маликов А. М. Опыт использования жесткого гидрографического трала на малых гидрографических катерах // Записки по гидрографии. – 1991. – №224. – С. 39–42.
2. Правила гидрографической службы №6 (ПГС №6), часть 1. – УНГС ВМФ, 1955. – 85 с.
3. Правила гидрографической службы №6 (ПГС №6), часть 2. – ГУ ВМФ, 1951. – 87 с.
4. Инструкция по гидрографическому тралению (ИТ-74). – ГУНиО МО, 1974. – 102 с.
5. Горшков В. Н., Свердлов А. А. Трал гидрографический полужесткий // Записки по гидрографии. – 1978. – №200. – С. 45–48.

On Validity of Hydrographic Sweeping by Stiff Sweeps

V. N. GORSHKOV (GNINGI, RF MoD)

The causes of errors resulting from sweeping by stiff sweeps are analysed. Recommendations for calibration of sweeps are given. As a result of calibration, the root mean square error of keeping the sweep at a set depth assumed during the surveys, is reduced.

ГРНТИ 37.25.31

ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОДНЯТИЙ ДНА В МЕЖДУГАЛСОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А. Л. ТЕЗИКОВ (ГМА им. адм. С. О. Макарова),
С. В. РЕШЕТНЯК (ФГУП «Гидрографическое предприятие»)

Показана возможность оценки вероятности пропуска локальных поднятий дна в междугалсовом пространстве в зависимости от междугалсового расстояния по данным промера. Приведен удобный алгоритм количественной оценки некоторых свойств подводного рельефа, скрытого от непосредственного наблюдения.

При проведении гидрографической съемки подводного рельефа по системе параллельных галсов основная информация о глубинах, углах наклона дна, его расчлененности и других характеристиках содержится в массивах данных, полученных на промерных галсах. Наличие необследованных междугалсовых пространств снижает достоверность интерпретации подводного рельефа и может привести к пропуску локальных поднятий дна, в том числе и опасных. Качество интерпретации зависит от

междугалсового расстояния и свойств рельефа. Очевидно, что при большом междугалсовом расстоянии степень сглаживания отображения рельефа усиливается, его мелкие детали пропадают. При уменьшении междугалсового расстояния выявляются более мелкие детали, обнаруживаются локальные формы с небольшими горизонтальными размерами.

От очевидных качественных представлений зависимости степени сглаживания подводного рельефа от междугалсовых расстояний перейдем к количественным оценкам. Для этого введем упрощенную модель подводного рельефа. Будем считать, что рельеф описывается некоторой гладкой поверхностью $Z(x, y)$ с наложенными на нее локальными поднятиями, имеющими форму сферических сегментов. Каждый сегмент характеризуется диаметром D и высотой H . Высота H относится к полюсу сегмента и определяет его превышение над поверхностью $Z(x, y)$. На плоскости такая модель будет представлена набором кругов разных диаметров, в центрах которых глубины имеют наименьшие значения. Допустим, что центры кругов на плоскости распределены случайно, а размеры кругов описываются функцией распределения $F(D)$.

Очевидно, что функция $F(D)$ должна быть нормируема, так как она является плотностью вероятности распределения кругов по диаметрам. Таким образом, для всей площади обследования должно выполняться условие:

$$\int F(D) dD = 1 \quad (1)$$

Функция $F(D)$ в общем случае неизвестна.

Допустим, что площадь обследуется с междугалсовым расстоянием L по прямым параллельным галсам. На каждом галсе производятся непрерывные измерения координат и глубин. Если допустить, что локальных поднятий в районе много, то над какой-то частью из них пройдут промерные галсы. На плоскости это будет выглядеть как пересечение части кругов системой параллельных прямых. Очевидно, что прямые линии пересекают круги не по их диаметрам, а по хордам, длины которых всегда меньше диаметров.

Обозначим длины хорд буквой d ($d \leq D$).

Введем функцию $W(d)$, описывающую плотность вероятности распределения измеренных хорд. Функция $W(d)$ может быть определена непосредственно из обработки результатов измерения глубин на галсах подсчетом числа локальных поднятий в зависимости от их горизонтальных размеров. При подсчете следует особо учитывать пересечения одного и того же круга двумя или несколькими соседними прямыми. Для больших кругов с диаметрами $D > 2L$ в таких случаях учитывается только одно пересечение.

Функция $W(d)$ должна быть нормирована так же, как и функция $F(D)$.

Обозначим общее количество локальных поднятий в районе буквой N , а количество кругов, которые были пересечены промерными галсами, буквой n . При этом очевидно, что n не может превышать N . Разность $N-n$ соответствует

тому количеству кругов, которое попало в междугалсовое пространство. К таким кругам относятся только те, которые имеют диаметры, не превышающие L . Локальные поднятия с относительно большими горизонтальными размерами, для которых $D > L$, будут обнаружены надежно. Для таких поднятий указанная разность равна нулю.

Число пересечений n может быть подсчитано непосредственно по результатам измерений на промерных галсах, поэтому известно. Общее количество поднятий N неизвестно и подлежит оценке.

Из теории геометрических вероятностей [1] известно, что вероятность пересечения кругов, имеющих диаметр D , одной из параллельных прямых, отстоящих на расстоянии L друг от друга, определяется соотношением

$$P = D/L \quad (2)$$

В выражении (2) $0 \leq P < 1$ при $D < L$ и $P = 1$ при $D \geq L$.

Допустим, что по результатам измерений установлено n пересечений галсов с кругами. При фиксированных значениях D и L вероятность этого события может быть определена по формуле (2). Вероятность попадания кругов в междугалсовое пространство можно вычислить по формуле $Q = 1 - P$. Если считать, что количество пересечений и пропусков кругов пропорционально вероятностям этих событий, то общее количество кругов N может быть оценено по формуле

$$\begin{aligned} \text{при } D < L & \quad N = nL/D, \\ \text{при } D \geq L & \quad N = n. \end{aligned} \quad (3)$$

Для того чтобы установить взаимосвязь функций $F(D)$ и $W(d)$, необходимо найти статистическую зависимость длин измеренных хорд d и соответствующих им диаметров кругов D . Такая зависимость может иметь вид:

$$d \approx 3D/4. \quad (4)$$

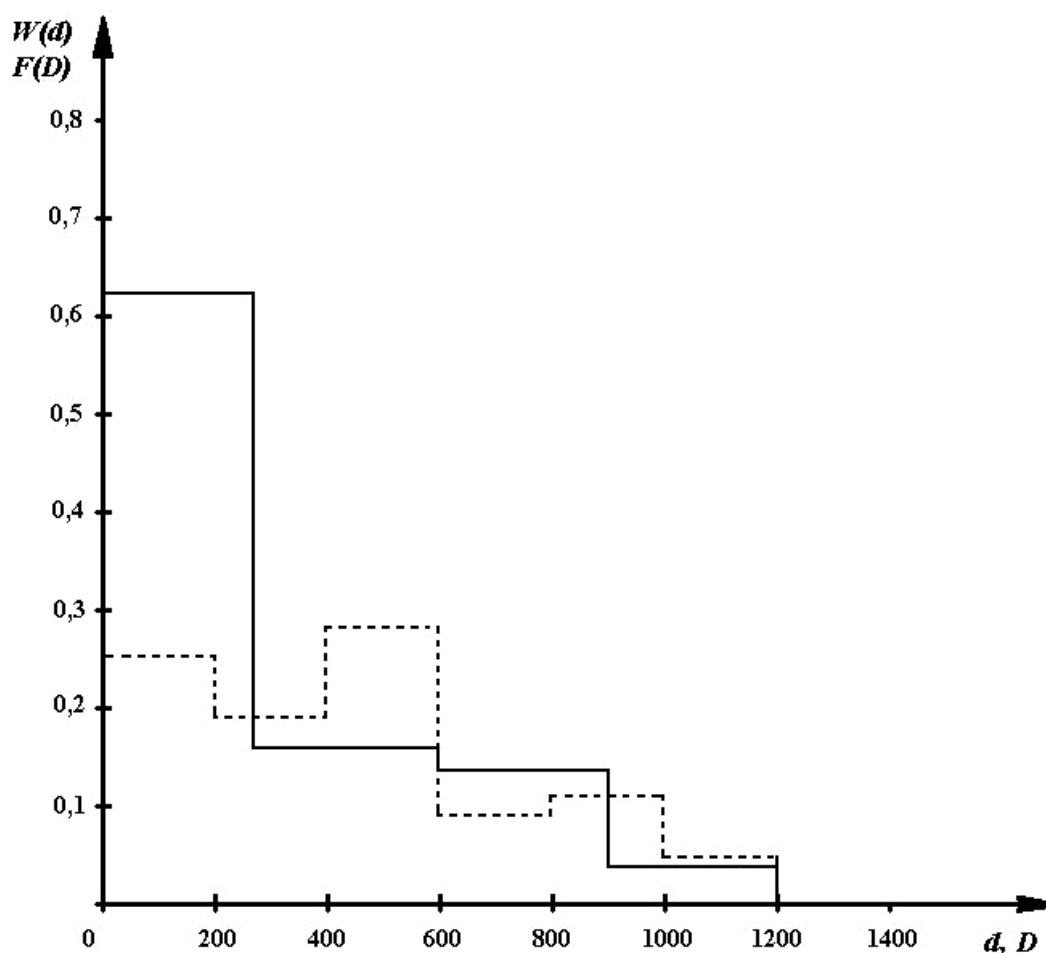
С учетом соотношений (3) и (4) взаимосвязь функций $F(D)$ и $W(d)$ определим следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \text{при } D < L & \quad F(D) = 3W(4d/3)L/4d, \\ \text{при } D \geq L & \quad F(D) = W(4d/3). \end{aligned} \quad (5)$$

Формулы (5) позволяют по результатам измерений на галсах восстановить плотность распределения кругов на площади. Анализ выражений (3) и (5) подтверждает тот очевидный факт, что в междугалсовое

пространство чаще попадают более мелкие локальные формы. При этом значение имеют не абсолютные горизонтальные размеры поднятий, а их отношение к величине междугалсового расстояния.

На рисунке представлены результаты обработки материалов промерных работ одного из районов морей Арктики, выполненного с междугалсовым расстоянием 1000 м. Обработка профилей позволила выделить 63 локальных поднятия. Гистограмма распределения горизонтальных поднятий, зарегистрированных на промерных галсах, на рисунке обозначена пунктирной линией. По этим данным наибольшая доля (29%) приходится на поднятия с горизонтальными размерами от 400 до 600 м, 25% – на поднятия с размерами до 200 м, 11% – на поднятия с размерами от 800 до 1000 м.



Гистограммы распределения длин хорд (пунктир) и диаметров (сплошная линия)

Сплошной линией на рисунке показана гистограмма распределения диаметров локальных поднятий, соответствующая восстановленной функции

$F(D)$. Наибольшая доля локальных поднятий (62%) относится к малым формам с размерами до 200 м. Доля объектов с размерами от 400 до 600 м уменьшилась до 14%, с размерами от 800 до 1000 м – до 3%.

Общее количество локальных поднятий по результатам восстановления составило 257, в том числе количество поднятий, попавших в междугалсовое пространство – 194. Среди последних наибольшее количество (144 поднятия) относится к формам с размерами до 300 м. Следует ожидать, что в районе в междугалсовое пространство попало 18 объектов с размерами от 600 до 900 м и три поднятия с размерами, превышающими 900 м.

Детальный анализ результатов измерения глубин по профилям показал, что для всех обнаруженных поднятий отношение d/h превышало 12, то есть все локальные поднятия были достаточно пологими. Последнее позволяет надеяться, что в результате проведенных промерных работ в районе со средними глубинами от 90 до 110 м не были пропущены опасные в навигационном отношении поднятия.

В заключение необходимо отметить, что предложенный подход к восстановлению параметров обследованного подводного рельефа основан на целом ряде упрощений. Тем не менее эти упрощения позволили получить достаточно простой алгоритм количественной оценки некоторых свойств подводного рельефа, скрытых от непосредственного наблюдения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кендалл М., Моран П. Геометрические вероятности. – М.: Наука, 1959. – 272 с.

Estimate of Density of Distribution for Local Bottom Rises Probabilities in the Survey Line Spacing

A. T. **TESIKOV** (Makarov State Maritime Academy),

S. V. **RESHETNYAK** (Federal State Unitary Enterprise «Hydrographic Enterprise»)

Based on the methods of geometric probabilities, the method that can be used to estimate the probability of missing the bottom rises with small cross-section during the hydrographic surveys, is presented.

ГРНТИ 37.25.29

**МЕТОД ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛЬНЫХ ПОДНЯТИЙ
ПОВЕРХНОСТИ МОРСКОГО ДНА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МОРСКОГО ПРОМЕРА**

С. В. РЕШЕТНЯК

(ФГУП «Гидрографическое предприятие»),

А. Л. ТЕЗИКОВ

(ГМА им. адм. С. О. Макарова),

В. Ю. БАХМУТОВ

(ГНИНГИ МО РФ)

На основе представления подводных локальных неровностей совокупностью сферических сегментов производится вероятностная оценка их параметров по результатам измерения глубин на параллельных галсах. Приводятся результаты оценки вероятности пропуска опасных поднятий в междугалсовом пространстве при условии, что на промерных галсах признаков таких поднятий не зафиксировано. Предложенный подход может использоваться для решения важной практической задачи – оценки материалов гидрографической изученности прошлых лет.

В отличие от топографической съемки земной поверхности, поддающейся прямому визуальному наблюдению, в гидрографии объект – морское дно, скрыто от прямого наблюдения водной толщей. Возможность визуального наблюдения влияет на конфигурацию измерительной сети и тактику измерений: измерительная сеть сгущается в зонах перегиба рельефа и мелких деталей и разрежается на выровненных участках. При выполнении гидрографической съемки поверхности морского дна зоны перегиба рельефа скрыты от непосредственного наблюдения, поэтому предпочтение отдается регулярным измерительным сетям, построенным по системе параллельных галсов. Измерение глубин и координат выполняется непрерывно по прямолинейному галсу. В междугалсовом пространстве измерения производятся дополнительно (сгущение), если на галсах обнаружены существенные изменения глубин.

Расстояние между галсами L выбирается в зависимости от глубины, степени расчлененности рельефа и дополнительных условий, определяемых заказчиками работ.

Введем упрощенную модель подводного рельефа. Будем считать, что средняя глубина в районе постоянная и равна Z_0 . Неровности дна образованы разномасштабными сферическими сегментами, имеющими диаметр S и превышение над средней поверхностью дна H . Форма сегментов определяется отношением $k=S/H$. При $k=2$ сегмент представляет собой полусферу. При возрастании параметра k сегмент уменьшается и становится более пологим. При $H<0$ сферический сегмент описывает впадину, при $H>0$ – поднятие. При $H<Z_0$ локальная форма подводная, при $H>Z_0$ вершина сегмента образует выступающую над водой осыхающую часть.

На плоскости такая модель будет иметь вид некоторой поверхности дна с наложенными на нее кругами с разными диаметрами S . Общее количество кругов (локальных форм подводного рельефа) в районе, а также их распределение по размеру и форме $f(S,k)$, на стадии проектирования промерных работ обычно неизвестны.

Для обнаружения локальной подводной формы необходимо, чтобы хотя бы один из промерных галсов прошел над ней, и локальное поднятие могло быть идентифицировано по отклонению измеряемой вдоль галса глубины от средних значений глубин. Малые формы ($S \leq L$) обнаруживаются по пересечениям с галсами с вероятностью [1]

$$P = S/L. \quad (1)$$

Для всех крупных форм, у которых $S \geq L$, вероятность обнаружения равна единице.

Для целей морской навигации особый интерес представляют локальные поднятия дна, которые могут быть отнесены к классу опасных. Если осадку судна, включая расчетный запас глубины под килем, обозначить буквой D , то к этому классу можно отнести все поднятия, для которых одновременно выполняются два условия:

$$\left. \begin{array}{l} S = kH \leq L \\ Z - D \leq H \end{array} \right\} \quad (2)$$

Для того, чтобы класс опасных локальных форм, определенных системой неравенств (2), исключить, необходимо междугалсовое расстояние L выбирать таким, чтобы

$$k_{\min} (Z - D) \geq L. \quad (3)$$

Например, на трассах Северного морского пути предполагается работа ледоколов и судов с осадкой $D=12$ м. Средняя глубина на участке трассы 20 м. Если считать, что ожидаемая опасность может быть описана полусферой ($k=2$), то максимально допустимое междугалсовое расстояние может составить не более 16 м. Если в этом районе выполнен промер с междугалсовым расстоянием 100 м, то в класс опасных форм будут входить сегменты, имеющие

$$\left. \begin{array}{l} 2 < k \leq 12,5 \\ 16 < S \leq 100 \end{array} \right\}$$

С учетом неравенств (2) и плотности распределения локальных поднятий по размерам и форме $f(S,k)$ вероятность пропуска опасных форм подводного рельефа при промере с междугалсовым расстоянием L может быть определена по формуле:

$$P_{\text{пр}} = 1 - 1/L \int_{S_{\text{min}}}^L \int_{k_{\text{min}}}^{k_{\text{max}}} f(S, k) dS dk, \quad (4)$$

где пределы интегрирования, за исключением величины L , определяются из неравенств (2). Применение формулы (4) на практике ограничено из-за отсутствия сведений о функции $f(S,k)$.

В работе [1] на основе анализа преобладающих в морях Арктики локальных форм подводного рельефа было предложено для оценки качества измерительных сетей применить параметр $k=8,7$. При этом оптимальное междугалсовое расстояние будет определяться формулой

$$L_{\text{опт}} = 8,7 (Z - D). \quad (5)$$

Вероятность пропуска опасного поднятия при $k=8,7$ и междугалсовом расстоянии L определяется выражением

$$P_{\text{пр}} = 1 - 8,7 (Z - D) / L. \quad (6)$$

Для приведенного выше численного примера вероятность пропуска локального поднятия с $k = 8,7$, полученная по формуле (6), будет равна

$$P_{\text{пр}} = 0,3.$$

При этом под опасными будут пониматься также и другие локальные поднятия, для которых $8,7 \leq k \leq 12,5$, $69,5 < S \leq 100$. Однако для всех этих форм вероятность пропуска будет меньше 30,4, так как эти формы имеют большие значения S и, следовательно, обнаруживаются легче.

Основная информация о наличии в районе локальных поднятий дна содержится в измерениях на отдельных галсах. Очевидно, что если на галсе зарегистрировано локальное поднятие дна с горизонтальными размерами ℓ и отклонением по глубине h , то можно утверждать, что $\ell < S$ и $h < H$. При этом экстремальная наименьшая глубина находится справа или слева от галса.

Допустим, что локальные поднятия на галсах не зарегистрированы. Означает ли это, что в междугалсовом пространстве их нет?

Для ответа на этот важнейший для гидрографа вопрос воспользуемся локальной теоремой Муавра-Лапласа [2]. Измерительная сеть обеспечивает обнаружение опасности с постоянной вероятностью $P_{\text{обн}} < 1$. Какова

вероятность того, что будут пропущены 1, 2 или 3 опасности в междугалсовом (необследованном) пространстве? Вычисления дают следующие результаты:

$$\begin{array}{ll}
 P_{0,1} \text{ (при } P_{обн}=0,4) = 0,6; & P_{0,3} \text{ (при } P_{обн}=0,6) = 0,05; \\
 P_{0,2} \text{ (при } P_{обн}=0,4) = 0,3; & P_{0,1} \text{ (при } P_{обн}=0,8) = 0,14; \\
 P_{0,3} \text{ (при } P_{обн}=0,4) = 0,17; & P_{0,2} \text{ (при } P_{обн}=0,8) = 0,01; \\
 P_{0,1} \text{ (при } P_{обн}=0,6) = 0,3; & P_{0,3} \text{ (при } P_{обн}=0,8) = 0. \\
 P_{0,2} \text{ (при } P_{обн}=0,6) = 0,13; &
 \end{array}$$

Приведённые численные оценки показывают, что при повышении подробности съёмки и уменьшении междугалсовых расстояниях (высокая вероятность обнаружения $P_{обн}=0,8$), вероятность пропуска опасностей существенно меньше, чем при больших междугалсовых расстояниях (при $P_{обн}=0,4$, $p=0,6$ и особенно при $P_{обн}=0,4$, $p=0$.)

Таким образом, факт отсутствия регистрации поднятий на галсах не всегда означает отсутствие локальных опасных поднятий в междугалсовом пространстве. Сомнения можно преодолеть, сгущая промер или используя специальные средства обследования междугалсового пространства – гидролокаторы или многолучевые гидроакустические системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Решетняк С. В.; Тезиков А. Л. Оценка качества морских гидрографических исследований. – СПб.: РТП ГП, 1994. – 35 с.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1978. – 832 с.

Method of Numerical Evaluation of Parameters for the Local Sea Bottom Rises When Conducting the Sea Survey

S. V. RESHETNYAK (Federal State Unitary Enterprise «Hydrographic Enterprise»),
A. L. TESIKOV (Makarov State Maritime Academy), V. J. Bakhmutov (GNINGI, RF MoD)

Based on presenting the submarine local rough elements as the aggregate of spherical segments, the probabilistic evaluation of their parameters, using the results of depth measurements on parallel sounding lines, is carried out. The results of evaluating the probability of missing the dangerous rises in the space between the tacks if no indication of such rises was detected on the sounding lines, are presented.

The proposed approach can be used to solve an important practical problem – evaluation of hydrographic survey materials obtained in the past surveys.

ГРНТИ 78.21.41

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОГО
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ
МОРСКИХ АКВАТОРИЙ**

Э. С. ЗУБЧЕНКО

(Военно-морская академия им. Н. Г. Кузнецова)

В статье анализируется современное состояние космической сканерной съемки и лазерного зондирования – оптических дистанционных методов и средств для съемки рельефа дна в прибрежной зоне. Приведены технические характеристики систем, раскрыты технологические приемы картографирования и проанализирована их точность.

Для картографирования морских акваторий в настоящее время используются следующие методы дистанционного зондирования: измерение интенсивности отраженного акваторией солнечного излучения в оптическом диапазоне с помощью оптико-электронных сканирующих систем, лазерное, радиолокационное и электромагнитное зондирование. Возможности этих методов для съемки рельефа дна определяются прежде всего разрешающей способностью бортовой аппаратуры для получения оптического или радиолокационного изображения акватории, пространственной дискретностью измерений аппаратурой для светолокации дна. Необходимым условием для их применения является также точность моделей, связывающих дистанционно измеряемую величину с глубиной и позволяющих решить обратную задачу извлечения значений глубин из данных дистанционных измерений параметров светового поля, формируемого акваторией, радиолокационного изображения поверхности акватории или наведенного электромагнитного поля. Координатная привязка точек изображения акватории или данных ее дистанционного зондирования требует наличия на борту космического или летательного аппарата навигационных систем для определения их местоположения и ориентации съёмочных систем, а также фотограмметрической модели оптического и радиолокационного изображения акватории. Рассмотрим современное состояние и перспективы решения перечисленных проблем для оптических методов дистанционного зондирования.

В настоящее время космические аппараты (КА) для дистанционного зондирования Земли (ДЗ) оснащаются съёмочной аппаратурой, позволяющей получать изображение поверхности Земли с разрешающей способностью, достаточной для картографирования рельефа дна. Так, в 2001 г. выведен на орбиту КА Quick Bird фирмы DigitalGlobe Inc. с фотограмметрической цифровой камерой, с помощью которой с высоты 450 км было получено изображение, имеющее разрешающую способность 0,6 м в панхроматическом канале и 3,28 м в зональных каналах [1]. Съёмочная

аппаратура КА IKONOS-2 MSI может производить съёмку в полосе 11 км в четырёх спектральных зонах: голубой (B) – 0,45–0,52 мкм, зеленой (G) – 0,52–0,60 мкм, красной (R) 0,63–0,69 мкм, ближней инфракрасной (NIR) 0,76–0,9 мкм с разрешающей способностью 4 м [2]. Израильский КА EROS-B1, запущенный в 2000 г., оснащен аппаратурой, имеющей разрешение на местности 1 м в панхроматическом канале и 4 м – в зональных каналах съёмки. Индийский КА IRS-P5 (Cartosat-2), запуск которого планировался на 2004 г., должен был иметь аппаратуру с разрешающей способностью 2,5 м в панхроматическом канале съёмки. Аппаратура КА «Orbview-4» имеет два оптических канала, пригодных для получения изображения морского дна, и разрешающую способность 8 м. Индийский КА TES, запущенный в 2001 г., оснащен аппаратурой для съёмки с разрешением 1 м. На КА установлены астроориентатор по звездам и приемник спутниковой навигационной системы, что дает возможность осуществлять координатную привязку снимков акватории при отсутствии геодезических опорных точек. Съёмка с разрешающей способностью в 1 м обеспечивает топографическое картографирование в масштабе 1:25000 [3].

В настоящее время отечественная космонавтика переживает период перехода от систем детального фотонаблюдения к космическим системам детального оптико-электронного наблюдения [4].

Федеральная космическая программа России на период до 2005 г. предусматривала создание двух перспективных космических комплексов ДДЗ гражданского назначения, которые, начиная с 2005 г., должны обеспечивать заинтересованные отрасли детальной геопространственной информацией. Первый из них – это космический комплекс оптико-электронного наблюдения «Ресурс-ДК1» [4], предназначенный для получения многозональной информации высокого разрешения и передачи её по радиоканалу на наземные пункты приёма в масштабе времени, близком к реальному. Бортовая аппаратура комплекса при съёмке в надир с высоты 350 км в полосе захвата 28,3 км обеспечивает получение изображений в панхроматическом канале (0,58–0,8 мкм) с разрешением на местности 1 м и в трёх зональных оптических каналах (0,5–0,6; 0,6–0,7; 0,7–0,8 мкм) с разрешением на местности 2–3 м. Съёмка может производиться как одним каналом, так и одновременно двумя или тремя каналами в трёх режимах:

- с непосредственной передачей информации в реальном времени на наземный пункт приёма в зоне взаимной радиовидимости;
- с записью информации в бортовом запоминающем устройстве, максимальная ёмкость которого составляет 768 Гбит;
- воспроизведения информации, записанной в бортовом запоминающем устройстве, и передачи на центральный наземный пункт приёма с задержкой не более 8 часов.

Для координатной привязки видеоинформации предусмотрена бортовая аппаратура измерения угловых элементов внешнего ориентирования и

положения центра масс КА. Однако, для создания измерительной основы с точностью определения взаимного положения точек, соответствующей точности карт масштаба 1:25000, требуется привлечение геодезических опорных точек. Следовательно, данный комплекс при недостаточном количестве (или отсутствии) опорных точек на акваториях морей не позволит решать эту задачу с точностью, требуемой для картографирования судоходных акваторий.

Аналогичными характеристиками должен обладать и второй комплекс оперативного природно-ресурсного мониторинга Земли «Ресурс-О1», оснащенный оптико-электронной аппаратурой высокого, среднего разрешения, а также ви́диоспектрометром. Оптикоэлектронная аппаратура спутника при съёмке в нади́р с высоты 680 км в полосе захвата 48 км должна обеспечивать получение изображений в одном панхроматическом (0,45–0,9 мкм) с разрешением на местности 1 м и в четырёх из шести возможных зональных оптических каналах (0,43–0,47; 0,51–0,59; 0,61–0,69; 0,7–0,8; 0,8–0,9; 0,8–1,1 мкм) с разрешением на местности 4 м.

Видеоспектрометр, включённый в состав бортовой аппаратуры комплекса «Ресурс-О1», в полосе захвата 8 км обеспечивает съёмку в 256 зонах спектрального диапазона 0,4–1,6 мкм с разрешением на местности 30 м [4].

Что касается методов извлечения батиметрической информации из данных оптического зондирования, то существует несколько направлений, по которым происходит их развитие в разных странах. Так, для картографирования мелководных районов, в особенности таких, в которых интенсивность судоходства не адекватна стоимости работ, выполняемых обычными методами, Гидрографическая служба Франции (SHOM) использует технологию на основе обработки зональных изображений, полученных оптическим сканером космической системы SPOT-5 [5]. Пространственное разрешение этой аппаратуры составляет в панхроматическом канале 10×10 м и 20×20 м в зональных каналах.

Получаемые для обработки исходные данные представляют массивы измерений яркости, соответствующие зональным изображениям интересующих акваторий. Космическая съёмка заданного района выполняется по заявке SHOM. При экранировании акватории облачностью выполняется повторная съёмка.

Технология извлечения глубин построена на модифицированном обобщенном методе отношений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) и математическом аппарате многомерного статистического анализа – метода главных компонент. В оптических моделях используют измеренные яркости воды в двух спектральных диапазонах. Для определения параметров модели используются глубины промера (не менее чем с одного галса от берега в море) с галсов, проложенных через участки акватории с отличающимися оптическими характеристиками грунта и воды.

Обработка включает радиометрическую и геометрическую коррекцию изображения, а также расчет батиметрической модели. В результате составляется карта, на которую наносятся: береговая линия, портовые сооружения, глубины, полученные по радиометрической информации, соответствующей изображениям акватории в различных зонах спектра, коралловые рифы. Эта карта используется при поиске проходов между коралловыми постройками и при планировании промера.

Радиометрическая коррекция производится для устранения полос на изображении, вызываемых особенностями съемки с помощью линеек фотоприемников.

Технологический процесс включает совместную обработку данных, полученных в зеленой, красной и ближней ИК зонах. Так, для установления причины изменения тона изображения (вследствие изменения наклона дна или типа грунта) вычисляют показатель прозрачности $n_f = \frac{G^2}{R}$, где G – величина сигнала, зарегистрированного в зелёной зоне, R – в красной зоне, и локальное стандартное отклонение этого показателя. Чтобы уменьшить влияние зависимости данных, полученных в зеленой и красной зонах, осуществляют переход из прямоугольных координат (G, R) в полярную систему (ρ, θ). Для выделения участков изображения с растительностью, вычисляют нормализованный разностный индекс растительности $NDVI = (NIR - R)/(NIR + R)$, где NIR – яркость пиксела в ближней ИК зоне; R – яркость пиксела в красной зоне. Путём вычисления так называемого индекса текстуры $\pi = 50(G/R)$ формируется массив данных для искусственного оптического канала. Далее производится вычисление глубин на основе обобщенного метода отношения КСЯ в трех зонах G, R, π с использованием математического аппарата главных компонент. Применение искусственного оптического канала позволяет преодолеть некоторые трудности при использовании данных только исходных зон.

Координатная привязка заключается в определении параметров преобразования координат точек изображения в картографические координаты. Для этого используются параметры орбиты, рыскание, тангаж и крен КА, а также координаты геодезических опорных пунктов. Координаты этих пунктов определяются путем наземных измерений по технологии дифференциальной GPS (DGPS). Для этой цели объекты, выбранные в качестве опорных точек на увеличенных изображениях, идентифицируются с объектами на местности. Для координатной привязки изображения используют от одной до пяти опорных точек. Метод позволяет при наличии только одной опорной точки достичь точности порядка 10 м, что соответствует размеру пиксела.

Другой подход для извлечения батиметрической информации из данных космической сканерной съемки реализован в Центре дистанционного

зондирования Великобритании [6]. При условии однородности отражательной способности дна и высокой прозрачности воды применяется метод регрессионного анализа. Для учёта изменчивости отражательной способности дна также используется обобщенный метод отношений КСЯ на основе математического аппарата главных компонент. В результате обработки данных сканерной съёмки в нескольких зонах получают два новых ряда данных: один, зависящий только от глубины, а другой – только от типа грунта дна. Первый ряд используется для получения по опорным глубинам уравнения регрессии, чтобы затем вычислять глубины по всему изображению, а второй – для определения типа грунта. Однако даже для идеальных условий возможности этих методов оцениваются такими показателями: определение глубин возможно вплоть до 12 м с разрешающей способностью по глубине 1–2 м и погрешностью ± 2 м. Считается, что в диапазоне от 12 до 20 м достижимо только трехметровое разрешение по глубине. По указанным причинам получаемые глубины не могут быть использованы для обеспечения навигационной безопасности. Считается, что получение глубин более 20 м возможно при очень высокой прозрачности воды.

За последнее десятилетие в области ДЗЗ значительное развитие получила спектрометрия. Гиперспектральные – в соответствии с зарубежной терминологией, а правильнее – сверхмногозональные, спектрометры обеспечивают измерение интенсивности отражённого земной поверхностью солнечного излучения в нескольких десятках и даже в нескольких сотнях узких спектральных зонах одновременно. Каждый объект имеет уникальный спектральный образ, который с помощью приборов данного типа можно регистрировать в широком диапазоне оптического спектра, включая ИК диапазон. Подобной системой является разработанный в США фирмой ITRES Research Limited гиперзональный сканер CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) [7]. Оптические каналы системы регистрируют отраженное солнечное излучение в полосе оптических и ИК длин волн со спектральным разрешением 0,003 мкм и пространственным разрешением от 2 до 10 м в зависимости от скорости полёта самолета и времени интегрирования принимаемого сигнала. Система является одной из 19 известных авиационных сверхмногозональных датчиков. Она может действовать в режиме с оптимизацией по спектральному или пространственному разрешению. При оптимизации по спектральному разрешению полоса захвата составляет 390 м. Изображение в системах такого типа, как и при сканерной съёмке, получают по так называемой «метелочной» технологии в узкой полосе, перпендикулярной направлению полета самолета, а за счет перемещения самолета изображение формируется из этих полос вдоль трассы полёта. CASI может действовать в двух режимах – пространственном и спектральном. Пространственное разрешение CASI зависит от высоты и скорости полета, а также времени экспозиции датчиков. В системе применяется пространственная корректировка мгновенного поля зрения, чтобы получить

одинаковые по размеру пиксели во всей полосе. Спектральный диапазон, который важен для океанографических приложений, соответствует 0,4–0,7 мкм. Прибор может быть использован на любом типе самолетов при высоте полета 335–3048 м.

Другие авиационные сверхмногозональные системы, такие как улучшенная авиационная гиперзональная ААНIS и цифровой авиационный отображающий сканер DAIS, используются в изучении морской среды (картографирование коралловых рифов и идентификация донной растительности) [8]. При спектральной разрешающей способности 0,003 мкм в оптимальном для съемки морских акваторий 0,5–0,6 мкм диапазоне может быть создано около 30 каналов, что открывает возможность повышения точности рассмотренного метода отношений КСЯ для определения глубин по данным многозональной съемки.

Аппаратура этого типа дает возможность получать информацию о прозрачности воды и ее температуре, типах грунта, растительности на дне. Разработанные для этого алгоритмы обработки регистрируемой датчиком информации позволяют исключить помехи, искажающие получаемый спектральный образ каждого элементарного участка поверхности Земли. Например, при регистрации сигнала, отраженного морским дном, исключаются помехи, связанные с бликами на поверхности моря, с рассеянием света атмосферой и слоем воды и с ослаблением света в воде. При комбинировании получаемых такой системой данных с измерениями оптических характеристик воды этими методами решается задача определения типа грунта дна по его отражательной способности в различных участках спектра.

В настоящее время все более широкое применение для съемки рельефа дна находят авиационные лазерные батиметрические системы (АЛБС), которые за рубежом по аналогии с радаром и сонарами получили название лидаров как устройств, реализующих принцип светолокации. В 2001 г. таких лазерных систем в мире насчитывалось более 60. За сравнительно короткий промежуток времени произошло существенное расширение возможностей подобных систем: частота посылки лазерных зондирующих импульсов возросла с 25–33 Гц до 1000 Гц и более, что обеспечивает съемку с заданной подробностью с большей скоростью и в более широкой полосе. В результате производительность таких систем возросла до 65 км² в час. Недостатком их является необходимость послеполетной обработки данных измерений. Для возможности последующего анализа и повышения достоверности данных съемки в большинстве АЛБС теперь предусматривается возможность регистрировать в полете в специальный файл значения интенсивности отраженного сигнала [2].

Гидрографическая служба ВМС Нидерландов рассматривает в качестве альтернативы традиционного метода съемки мелководных акваторий

однолучевыми и многолучевыми эхолотами съемку с помощью АЛБС, нового поколения с частотой посылки импульса 900 Гц [10].

В Австралии за последние годы использование АЛБС для съёмки рельефа дна прибрежных акваторий приобрело производственный характер. Так, для картографирования территориальных вод и исключительных экономических зон применяются АЛБС RAN LADS и LADS МК II, LADS, разработанные в Австралии для съёмки больших площадей с глубинами до 70 м [11].

В частности система RAN LADS разработана в соответствии с государственной программой для съёмки в прибрежных зонах, не обеспеченных судовым промером, и постоянно используется Гидрографической службой ВМС Австралии для сбора данных для составления навигационных морских карт (НМК). Качество съёмки с помощью LADS соответствует съёмке первой категории, определенной Стандартом S-44 МГО. Система установлена на самолете F-27 производства фирмы Fokker.

Система LADS Mk II, установленная на самолете Havilland Dash 8-202, является собственностью и используется фирмой LADS Corp. для выполнения съёмочных работ по контракту.

АЛБС рассматриваемых типов имеют авиационную и наземную компоненты. Первая включает полупроводниковый лазер, смонтированный на стабилизированной платформе, и излучающий световые импульсы на длинах волн 1,064 мкм и 0,532 мкм. Приём лазерных импульсов, отраженных от морской поверхности и морского дна в пределах фиксированных углов качки самолета, осуществляется приемной оптической системой, также смонтированной на стабилизированной платформе. Данные съёмки регистрируются и проходят предварительную обработку на борту. Окончательная обработка производится в наземной подсистеме.

Глубина зондирования зависит от прозрачности воды. В общем случае LADS может измерять глубину, в 2–3 раза превышающую глубину исчезновения видимости диска Секки. Таким образом, в прозрачных океанских водах она будет составлять 70 м, в прозрачных прибрежных водах – от 40 до 50 м, в менее прозрачных прибрежных водах – от 30 до 35 м, в умеренно мутных водах – от 15 до 25 м, а в очень замутненных водах – от 0 до 15 м.

Съёмка с помощью LADS производится, если волнение не превышает 3–4 баллов. При более сильном волнении наличие белых гребней требует коррекции при обработке данных и уменьшает достоверность получаемых результатов съёмки.

АЛБС обладает следующими характеристиками:

- возможностью изменять подробность съёмки в зависимости от морфометрических особенностей обследуемого района;
- возможностью получения результатов съёмки не позднее чем через 24 часа после её проведения;

- высокой мобильностью при необходимости перемещения к удаленным местам съемки (в пределах нескольких дней с момента получения задания на проведение работ);
- возможностью координированных действий со съемочными судами, чтобы обеспечить полное покрытие мелководных и глубоководных районов;
- адаптивностью к условиям съемки: наличию волнения и фактической прозрачности воды.

LADS обеспечивают съемку 10 тыс. км² ежегодно, что представляет 50% всех объемов гидрографических съемок, выполняемых Гидрографической службой ВМС Австралии. Кроме того, с помощью LADS Mk II съемки выполнены для правительственных агентств и частных компаний Норвегии, Великобритании, Новой Зеландии, Австралии. При этом LADS использовалась в различных природных условиях для решения разнообразных съемочных задач и продемонстрировала следующие возможности. Съемочный вылет обычно имеет продолжительность от 6,5 до 7,5 часов. Производительность зависит от удаления района съемки от операционной базы, размеров и формы съемочной площади. Дистанция перегона самолета типа Dash 8, на котором в случае международного транзита и длительной съемки устанавливаются дополнительные баки, составляет приблизительно 3600 км. Дневная производительность варьировала в пределах от 75 до 300 км² за вылет.

Съемка независимо от высоты полета и глубины может проводиться с подробностью одна глубина на 4×4, 3×3 и 2×2 м². На стандартной съемочной скорости полета 175 узлов – одна глубина на 5×5 м² в полосе шириной 240 м.

С помощью LADS Mk II производились съемки прибрежных вод Норвегии, Новой Зеландии и вод у побережья Антарктики. Общая площадь съемок превышает 2000 км², наибольшая производительность за один вылет достигала в 234 км². Максимальное удаление пункта базирования от района съемки составило 1100 км. Было выявлено свыше 300 неизвестных ранее отмелей.

В США технология гидрографической съемки мелководий на основе использования АЛБС также рассматривается как одна из наиболее перспективных [11]. Океанографическое управление ВМС США (NAVOCEANO) применяет АЛБС SHOALS (Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey) для сбора гидрографической информации в литоральной зоне в интересах НГО действий боевых пловцов. Это ведомство получило возможность расширить способность с помощью SHOALS и CASI оперативно получать более полную картину состояния морской среды.

Эта система устанавливается на вертолете типа Bell 212 или самолете типа Twin Otter [7].

Приемные каналы АЛБС регистрируют отраженные импульсы (волновые формы) на длинах волн 0,1064 и 0,532 мкм и отраженную энергию неупругого (рамановского) рассеяния на длине волны 0,645 мкм. В SHOALS

используется две волновых формы отражённых сигналов, чтобы выделить на них импульс, отраженный от дна: одна – для малых глубин, другая – для больших (около 40 м). Чтобы достоверно определять границы раздела «воздух-вода», в SHOALS также используется каждая из двух зарегистрированных волновых форм отраженного сигнала. Данные, полученные в ИК канале, используются, чтобы иметь возможность отличить сигнал, отраженный от воды, от сигнала, отраженного суши. Предпочтительнее для этих целей использование отраженного импульса на длине волны 0,645 мкм. В связи с необходимостью отображения на НМК территории осушки, дюн, возвышающихся над водой береговых структур в 1996 г. SHOALS была модифицирована, чтобы дополнительно обеспечивать топографическую съемку. Для этих целей зондирование поверхности суши также производится с помощью импульсов на длине волны 0,532 мкм. Последняя модель системы имеет маркировку SHOALS 1000T. Технические характеристики SHOALS 1000T приведены в таблице [8].

Технические характеристики АЛБС SHOALS 1000T

Частота посылки зондирующих импульсов, кГц	1(3)
Высота съемки, м	200-400
Скорость летательного аппарата, км/час	200-300
Максимальная измеряемая глубина, м	70
Точность измерения глубины (СКП), м	0,25
Точность планового положения измеряемой глубины, м	2,5
Ширина полосы съёмки	0,6 от высоты полета
Дискретность измерения глубин на сетке с шагом	2×2, 3×3, 4×4, 5×5 м

Координирование съемки производится либо с использованием DGPS по данным передаваемым контрольно-корректирующими станциями (ККС) Береговой охраны США или системы OMNISTAR, либо применением кинематического режима в реальном времени (RTK), обеспечиваемого местными ККС. При использовании технологии RTK и OTF (разрешение неоднозначности значений целого числа циклов при фазовых измерениях дальности), точность определения планового положения глубины может быть улучшена до 1 м.

На основании независимой проверки двумя ведомствами – Национальной океанской съемкой (NOS) и ВМС США – были сделаны выводы о том, что данные, получаемые с помощью SHOALS, соответствует требованиям МГО к съемке первой категории. Для этой цели были произведена съемка 22 квадратных миль подходов к бухте Тампа с помощью судна с однолучевым эхолотом и с помощью SHOALS. Сравнение глубин, измеренных эхолотом, производилось в 5,5 млн. точках поверхности,

моделирующей дно акватории и построенной по данным съемок с помощью SHOALS. Среднее значение разности составило 7 см. Принимая, что дисперсия разностей между измерениями каждой системой и реальными глубинами равны, общая погрешность для каждой съемки составила 0,14 м [13].

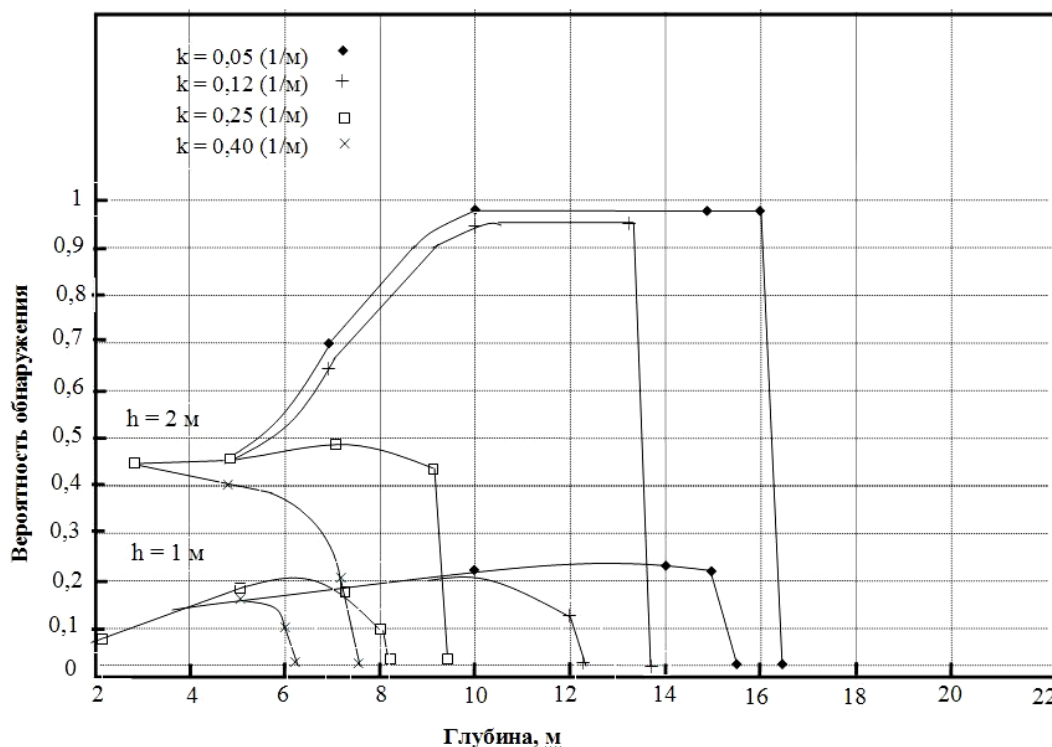
Для оценки возможностей SHOALS и подобных ей систем выявлять малоразмерные объекты, представляющие навигационную опасность, проведено математическое моделирование вероятности обнаружения таких объектов на морском дне [12]. Моделирование проводилось для условий различной пространственной плотности измеряемых глубин, различных глубин, прозрачности воды и размеров объекта. Определены два типа обнаружения. Первый соответствует случаю, когда отражения импульса от объекта и дна могут быть разделены на зарегистрированной волновой форме отраженного дном сигнала, второй – случаю, когда такие отражения не разделяются, а наличие объекта устанавливается в результате обработки по наименьшей глубине.

Обнаружение не происходит, если цель не облучается зондирующим импульсом или когда волновой фронт отраженного от облученного или частично облученного объекта не позволяет выявить наименьшую глубину. Вероятность обнаружения объекта принимается равной отношению площади пятна на дне, освещаемого лазером, к площади квадратной ячейки со стороны, представляющей среднее расстояние между точками лазерного зондирования. Объекты, подлежащие обнаружению, представлялись вертикальными круглыми цилиндрами высотой 1 и 2 м с площадью основания 1 и 4 м² (с диаметром 1,13 и 2,26 м). Вероятности обнаружения объектов высотой 1 м с площадью основания 1 и 4 м² для промерной сетки размером 4×4 м² и для угла падения зондирующего луча, равного 23°, представлены на рисунке как функции глубины [6]. При моделировании использовались четыре значения коэффициента вертикального ослабления света k , начиная от самой прозрачной (0,08 м⁻¹) до очень мутной (0,4 м⁻¹) воды.

Из рисунка следует, что вероятность обнаружения выше для больших площадей основания и высот цели в более прозрачной воде. Для глубин до 5 м вероятность не зависит от прозрачности, а значительно зависит от вертикального размера цели и меньше от площади основания цели.

Вследствие расширения лазерного пучка с глубиной вероятности обнаружения возрастают на средних глубинах, а прозрачность воды делается существенным фактором. В диапазоне глубин 10–20 м для принятых значений прозрачности воды вероятность обнаружения цели высотой 2 м близка к единице. Вероятности обнаружения цели высотой 1 м при площади основания цели, равной 4 м², редко превышают величину 0,6 и не превышают величину 0,25 при площади, равной 1 м². Для типовых условий прозрачности прибрежных вод (0,12 и 0,25 м⁻¹) глубина обнаружения сигнала от цели площадью 1 м² может составлять от 8 до 13 м и 10–17 м для цели площадью

4 м². Наибольшая моделируемая глубина обнаружения цели составила 21 м и соответствует прозрачности воды, характеризуемой коэффициентом ослабления $k = 0,08 \text{ м}^{-1}$.



Вероятность обнаружения на дне объекта в виде цилиндра площадью основания 1 м², высотой $h = 1$ и 2 м в зависимости от глубины (м) для различных показателей вертикального ослабления света k

Вероятности обнаружения для других значений подробности съемки, отличающегося от моделируемого значения (одна глубина на 4×4 м²) могут быть оценены умножением представленного на рисунке результата на коэффициенты: 1,78 при пространственной дискретности измерения глубин 3×3 м², и 0,64 – для 5×5 м². Естественно, это имеет смысл, когда результат меньше единицы.

Таким образом, с помощью АЛБС типа SHOALS на дне могут быть обнаружены небольшие объекты, но при меньшей подробности промера, чем моделировалась, обнаружение не может быть гарантировано, вследствие того, что отражение от цели часто намного слабее, чем соседнее отражение от дна. Необходима разработка специального программного обеспечения для того, чтобы, во-первых, выявлять полезный сигнал от небольших объектов на дне и, во-вторых, сохранить информацию об обнаружении.

Базируясь на результатах организованных оперативных съемок с помощью SHOALS, Береговая съемка NOAA определила подход для

использования данных лазерных съемок для составления и корректуры НМК. Разработанные инструкции по выполнению гидрографических съемок с помощью АЛБС определяют допустимую прозрачность воды (или параметры зондирующего сигнала), пределы размеров деталей, стандартной плотности глубин для обследования скал, коралловых рифов, затонувших судов или препятствий, обнаруженных при прежних съемках.

Общеизвестной проблемой при пассивном оптическом зондировании дна является учет влияния изменений глубины на измеряемую яркость дна. В исследовательской лаборатории ВМС США предложен метод использования оптической информации, получаемой SHOALS (системный коэффициент ослабления), и данных о глубине для расчета оптического пути на каждой опорной глубине [12]. Прямое вычисление коэффициента отражения дна может быть сделано с учетом модели отражения слоя воды. Отсутствие надежных и подробных данных об оптических свойствах прибрежных вод затрудняло создание соответствующей оптической модели, базирующейся на измерениях коэффициента отражения дна. Однако подобная модель разработана в программе «Оптические характеристики прибрежного бентоса» (SOBOP) Отдела военно-морских исследований (ONR) и значительно расширила возможность быстро характеризовать мелководную морскую среду с помощью данных съемки сверхмногозональной системой [7].

Анализ спектральных характеристик морского дна является более сложным, чем поверхности объектов суши. Вследствие экспоненциального возрастания ослабления света в красной области спектра большинство морских оптических исследований ограничено видимой зоной спектра от 0,4 до 0,7 мкм. Только 2–7% водных объектов различимы по спектральным свойствам, в отличие 10–50% для объектов суши.

Существенным шагом в расширении функций АЛБС является их комбинация с сверхмногозональным спектрометром CASI. Съемка акваторий с помощью комбинации этих систем позволяет получать данные о транспортировке осадочных пород в прибрежных водах. Эти данные используются Морской инженерной службой ВМС США для оценки заносимости пунктов базирования, портов и гаваней [7].

ВЫВОДЫ

1) Современный этап развития систем дистанционного зондирования Земли из космоса характеризуется разработкой и установкой на космических аппаратах оптической сканирующей аппаратуры с высоким пространственным разрешением и имеющей оптические каналы, соответствующие максимуму прозрачности морской воды. Это позволяет получать изображение дна в диапазоне глубин, ограниченном условиями оптической прозрачности воды с требуемым пространственным разрешением. Устанавливаемая на КА навигационная аппаратура обеспечивает координатную привязку точек зондирования с погрешностью около 10 м.

2) Существующие методы получения информации о рельефе и грунте дна основаны на использовании данных многозональной съемки акваторий. В качестве математического аппарата используется многомерный статистический анализ. На основе данных методов реализованы производственные технологии картографирования прибрежных акваторий с невысокой интенсивностью судоходства.

3) Состояние методов и средств съемки акваторий на основе активного зондирования в оптическом диапазоне характеризуется усовершенствованием существующих и созданием новых авиационных лазерных батиметрических систем, расширением их функциональных возможностей. Развитие этих систем идет в направлении повышения частоты зондирования, придания системе функций обнаружения малоразмерных подводных препятствий, возможности проведения топографической съемки. Комплексирование этих систем с видеоспектрометрами дает возможность получения данных о грунте дна и процессах переноса взвешенного вещества для определения заносимости акваторий.

4) Следует отметить, что возможности пассивных оптических методов дистанционного зондирования использованы еще не в полной мере. Один из путей повышения точности получения информации о рельефе дна состоит в разработке оптической модели формирования и регистрации дистанционной системой изображения дна, настраиваемой по опорным глубинам. Учитывая, что оптическое изображение имеет высокое пространственное разрешение и прямую зависимость от глубины, применение такой модели позволит достичь более высокой точности, соответствующей задаче картографирования важных в судоходном отношении прибрежных акваторий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Annual Report 1999 – Technical Commissions Reports // ISPRS Highlight. – 2000. – Vol. 5. – No 1. – P. 6–37.
2. Annual Report 2001 – Technical Commissions Reports // ISPRS Highlight. – 2002. – Vol. 7. – №1. – P. 8–26.
3. Кравцова В. И. Снимки сверхвысокого разрешения – новый компонент фонда цифровых космических снимков // Геодезия и картография. – 2004. – №7. – С. 17–26.
4. Киенко Ю. П., Лукашевич Е. Л. Перспективные космические средства детального дистанционного зондирования Земли // Геодезия и картография. – 2002. – №1. – С. 3–5.
5. Gouic M., Even M., Tournay J. P. Hydrographic use of satellite imagery in South Pacific // Hydro INTERNATIONAL. – 2004. – Vol. 8. – №5. – P. 29–31.
6. Shannon J. The sea from Space // Hydro INTERNATIONAL. – 1999. – Vol. 3. – №2. – P. 7–9.
7. Smith R. A. et al. Airborne lidar and airborne hyperspectral imagery: a fusion of the proven sensors for improved hydrographic surveying // Proceedings, Canadian Hydrographic Conference 2000, Montreal, Canada. <http://shoals.sam.usace.army.mil/Pages/NewsLidar.htm>.
8. Рекламный проспект фирмы «ГЕОЛИДАР», 2006.
9. Lavender S. The application of remote sensing to hydrography // The Hydrographic Journal. – 2001. – №99. – P. 9–13.
10. Velthoven W. Suitability of airborne Lidar Bathymetry for the Netherlands // Hydro International. – 2004. – Vol. 8. – №5. – С. 45–47.

11. Sinclair M. Application of Laser Airborne Depth Sounder for EEZ Delimitation and management // EEZ Technology.– 1999. – P. 95–99.
12. Armstrong A. A., Huff L. C., Glang G. F. et al New technology for shallow water hydrographic surveys // International Hydrographic Review. – 1998. –Vol. LXXV. – №2. – P. 27–40.
13. Riley J. L. Evaluation SHOALS Bathymetry using NOAA Hydrographic Survey Data // Proceedings 24-th Joint Meeting of UJNR Sea-bottom Surveys Panel. 1995, [http: //shoals. sam. usace. army. mil/Pages/NewsLidar.htm](http://shoals.sam.usace.army.mil/Pages/NewsLidar.htm).

The Present-Day State of Optical Remote Sensing Means and Methods for Charting the Sea Water Areas

E. S. ZUBCHENKO (Kuznetsov Naval Academy)

The current state of the optical remote method and means for survey of the sea bottom in the coastal zone, i. e. the space scanner survey and laser sounding, is analysed. The technical characteristics of the systems and technological methods of charting are presented; their accuracy is analysed.

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ОКЕАНОГРАФИЯ

ГРНТИ 78.21.43.15

О ПРЕДЕЛЕ ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ

Б. Н. БЕЛЯЕВ
(ГНИНГИ МО РФ)

В свете публикаций разных лет обсуждается смысл понятия «предел предсказуемости» и связанные с ним вопросы.

Исторически сложилось так, что само слово «прогноз» ассоциируется прежде всего с предсказанием погоды. Поскольку такое предсказание далеко не всегда можно считать успешным, отношение широких слоёв населения, включая специалистов различного профиля, зачастую оказывается достаточно скептическим: дескать, не стоит рассчитывать на прогноз, лучше учитывать фактическую информацию.

Однако со временем пришло понимание, что прогнозирование является отнюдь делом не одних гидрометеорологов, а осознанно или неосознанно осуществляется буквально каждым человеком. В самом деле, любая деятельность человека состоит из последовательности планирования своих действий, которые он намерен предпринять, и выполнения каждого из них. При этом, поскольку при планировании всегда учитывается будущая, то есть относящаяся к моменту выполнения действия, ситуация, то человек вынужден пользоваться прогнозом. Этот прогноз в простейших случаях он даёт сам, чаще всего пренебрегая возможным изменением существующей при планировании ситуации, даже не подозревая, что пользуется так называемым методом инерционного прогнозирования. Поэтому не удивительно, что в последнее время всё чаще появляются публикации, посвящённые методологии и другим общим вопросам прогнозирования вне связи с прогнозированием гидрометеорологических условий, (например, доклад [1]). Во многом содержание таких работ повторяет положения, давно известные гидрометеорологам, в том числе и такие, которые в работах гидрометеорологического профиля сформулированы недостаточно определённо. К ним, в частности, относится понятие предела предсказуемости или, по терминологии работы [1], горизонта прогноза.

Но прежде необходимо уточнить сам термин «прогноз». В различных источниках под прогнозом понимается утверждение касательно будущего,

сформированное научными методами. Словосочетание «научные методы» само по себе достаточно неопределённо и позволяет весьма субъективно относить тот или иной метод к категории научного или ненаучного. Например, в монографии [2] доказывалось, что внеземные явления несущественно влияют на состояние земной атмосферы и, следовательно, не должны учитываться в прогнозах погоды. Но из статьи [3] следует обратное, хотя предложенный в ней метод [4] не опирается на доказательные теоретические положения и может быть оценён как ненаучный. В то же время испытания этого метода привели к выводу о его практической значимости и можно ли лишать его права называться методом *прогноза*?

Таким образом, прогнозом следует называть любое утверждение касательно будущего, независимо от того, каким методом оно сформировано.

Но для того, чтобы судить о качестве прогнозов данным методом, необходимо располагать значениями показателей, характеризующих это качество. Обычным, хотя и не единственно возможным, способом получения оценок таких значений является сравнение текстов прогнозов с фактическими данными, отнесёнными к сроку действия прогноза. Поскольку погрешности прогноза суть случайные величины, то, подвергнув результаты сравнения стандартной статистической обработке, можно получить закон распределения погрешностей, который, как известно, является полной характеристикой свойств случайной величины. На практике закон распределения чаще всего не определяют, ибо, во-первых, для этого зачастую не хватает данных, а, во-вторых, в этом нет необходимости, поскольку использование закона распределения в практических целях неудобно, если не невозможно. Как, например, сравнить методы прогноза одной и той же величины. Если их качество характеризуется разными законами распределения погрешностей? Поэтому обычно ограничиваются расчётом одной из числовых характеристик распределения: среднего квадратического отклонения, когда прогнозируется величина, или оправдываемостью, когда прогнозируется событие (то есть фаза явления). При этом первая из названных характеристик является более универсальной, так как может быть использована и при прогнозе фазы явления путём наложения непрерывной функции на зависимость фазы от предиктора. Но в метеорологической практике поступают как раз наоборот: применяют понятие оправдываемости к прогнозам величин, что приводит к необходимости использовать дополнительные условия в виде временных и пространственных интервалов, при попадании в которые прогноз считается оправдавшимся. Например, оправдавшимся считается прогноз температуры воздуха, если предсказанное значение не отличается от соответствующих наблюдавшихся значений более чем на 2 градуса на 3/4 метеостанций данного района. Числа эти совершенно произвольны и очевидно, что если их изменить, например, на 3 и 2/3 соответственно, то оправдываемость прогноза окажется более высокой. Поэтому пользоваться данными о такой

«оправдываемости», имеющей широкое хождение в различных гидрометеорологических органах, ни в коем случае нельзя.

Укажем ещё на один способ оценки качества прогноза. Он основан на вычислении оценки корреляции между прогнозными и соответствующими фактическими значениями величины. Очевидно, что чем больше коэффициент корреляции, тем выше качество прогноза. Однако представляется, что такой показатель качества имеет малый интерес для практики гидрометеорологического обеспечения из-за того, что он не отличается наглядностью для пользователя и не может быть использован при количественном усвоении гидрометеорологической информации в процессе обоснования и принятия решений [5].

Из высказанных выше соображений о том, что понимать под прогнозом следует, что предела предсказуемости в абсолютном смысле не существует: в принципе можно предсказывать что угодно и с какой угодно заблаговременностью. Но в относительном, сравнительном смысле существование такого понятия вполне правомерно. При таком подходе пределом предсказуемости определённой величины или события данным методом является наибольшая заблаговременность прогноза, которая не меньше заблаговременности аналогичного прогноза другим методом. Например, упоминавшийся выше инерционный прогноз гидрометеорологических условий обладает малым пределом предсказуемости, так называемые методические прогнозы (основанные на специально разработанных методах) превосходят его по качеству, зачастую спустя несколько часов. Наоборот, климатические прогнозы, когда за предсказываемое значение принимается среднегодовое значение (климатическая норма), обладают практически неограниченным пределом предсказуемости.

ЛИТЕРАТУРА

2. Малинецкий Г. Г., Курдюмов С. П. Нелинейная динамика и проблема прогноза. // М.: – Вестник РАН. – 2000. – Т. 71. – №3. С. 210–232.
3. Монин А. С. Прогноз погоды как задача физики. – М.:Наука, 1969. – 184 с.
4. Полозов В. В. Нетрадиционный метод сверхдолгосрочного прогноза температуры воздуха, осадков и других геофизических элементов. // Навигация и гидрография. – 1998. – №6. С. 100–104.
5. Способ прогноза геофизических величин. Пат. 212744 РФ/ Полозов В.В.
6. Основы теории навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения Военно-Морского флота (Ч. 1) – СПб.: ГУНИО МО. – 2003. – 160 с.

On Predictability Limit for Hydrometeorological Processes and Phenomena

B. N. BELYAEV (GNINGI, RF MoD)

The sense of the notion «predictability limit» and the problems connected with it are discussed in the light of various publications.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БАНКА ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВМФ

**А. Б. ОПАРИН,
А. Ю. УСТИМЕНКО**
(ГНИНГИ МО РФ)

В статье на основе накопленного в ГНИНГИ МО РФ опыта приводится обзорное освещение состава, состояния и перспектив развития банка океанографических данных НИЦ ГНИНГИ МО РФ, излагается общая информация о проделанной работе и накопленном опыте.

Гидрометеорологические условия оказывают существенное влияние на применение сил, оружия и технических средств ВМФ. От качества гидрометеорологической информации в известной степени зависит обоснованность решений по применению сил флота и эффективность использования комплексов вооружения.

К числу важнейших задач совершенствования гидрометеорологического обеспечения (ГМО) ВМФ относится перевод банка океанографических данных НИЦ ГНИНГИ МО (БОД), формируемого в ГНИНГИ МО Единого центра океанографических и гидрографических данных Минобороны России, на современные информационные технологии для его более эффективного использования в интересах обороны страны.

Решение этих задач является обязательным условием эффективного функционирования НИЦ ГНИНГИ МО РФ, в том числе в составе абонентской сети (АС) ГМО ВМФ и Единой системы информации о Мировом океане (ЕСИМО).

В соответствии с Положением о формировании и использовании БОД ВМФ, Положением о военном контуре ЕСИМО, а также Положением о ГНИНГИ МО РФ к основным функциям информационного океанографического обеспечения относятся:

- обеспечение автоматизированного сбора результатов океанографических наблюдений ВМФ (учет поступления, ведение базы метаданных, занесение информации в базы данных);
- создание, ведение и пополнение интегрированных и специализированных баз океанографических данных;
- контроль качества информации;
- конвертирование и переформатирование данных наблюдений и результатов обработки, создание пользовательских баз данных;
- статистическая и специальная обработка результатов наблюдений;
- подготовка информации и информационной продукции для длительного хранения, обмена;

– представление информации и информационной продукции по запросам в текстовом, табличном, графическом виде, в виде карт-схем в соответствии с требованиями потребителей.

За последние годы в части формирования и ведения банка данных выполнен ряд основополагающих работ:

– проанализирован состав информационных ресурсов и технологий формирования и ведения БОД ведущих мореведческих организаций страны и мира;

– обоснованы функции, структура БОД МО РФ, состав аппаратно-программных средств и технологическая схема его формирования и ведения;

– разработаны предложения по составу нормативно-методических документов, необходимых для эффективного БОД МО РФ;

– разработаны проекты нормативных документов, обеспечивающих функционирование БОД: проект Положения о формировании и использовании БОД и проект Положения о военном контуре ЕСИМО;

– разработана технология занесения первичной информации на магнитные носители;

– обобщены и унифицированы форматы хранения океанографических данных;

– разработаны программные модули и технология переформатирования, хранения, выборки и подготовки первичной информации для дальнейшей обработки и представления потребителям;

– разработаны программные модули и технология контроля качества информации, статистической обработки и представления обобщенной информации потребителям;

– разработаны проекты методических документов по формированию и БОД;

– пополнен фонд информационных ресурсов БОД ВМФ;

– обоснован состав, разработаны методы и программные модули расчета гидрометеорологических условий, данных наблюдений о которых, недостаточно для статистических обобщений;

– верифицированы разработанные методы расчета гидрометеорологических условий;

– разработан макет интегрированной информационно-справочной океанографической системы по одному из регионов Мирового океана;

– пополнен и создан информационный фонд БОД МО РФ.

Разрабатываемые и совершенствуемые технологии формирования и ведения баз океанографических данных проходят апробацию и внедряются непосредственно на рабочих местах в составе автоматизированных рабочих мест (АРМ). Установленным порядком проходят утверждение программные и методические документы по ведению БОД.

НИЦ ГНИНГИ МО является элементом системы навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения ВМФ, в состав которой входят:

- подсистема производства гидрометеорологических наблюдений и выполнения экспедиционных океанографических исследований;
- подсистема сбора, хранения, обработки, анализа и подготовки результатов океанографических, гидрографических, геофизических и других исследований для прикладного использования;
- подсистема передачи результатов обобщений и специализированных расчетов, обеспечивающая информационное взаимодействие потребителей информации с подсистемой сбора, обработки и хранения информации.

ГНИНГИ МО РФ является головной организацией в Министерстве обороны РФ осуществляющей функции Центра ЕСИМО и объединяющей специализированные центры Военно-Морского Флота, которые по дисциплинарным направлениям представлены как:

- судовые и специальные океанографические и геофизические исследования (НИЦ ГНИНГИ МО);
- результаты гидрографических и геофизических работ (280 ЦКП ВМФ);
- результаты гидроакустических исследований (НИЦ РЭВ в/ч 30895);
- оперативные гидрометеорологические наблюдения (373 Центр ВМФ).

К основным областям использования информации о состоянии природной среды Мирового океана, которыми располагает НИЦ ГНИНГИ МО, относятся:

- гидрометеорологическое обеспечение ВМФ;
- навигационно-гидрографическое обеспечение ВМФ;
- обеспечение навигационной безопасности общего мореплавания и другой деятельности, связанной с решением народнохозяйственных и оборонных задач РФ.

Конечной целью использования информации о состоянии природной среды является обеспечение принятия оптимальных решений многообразных оборонных и хозяйственных задач.

Результаты экспедиционных исследований ГС ВМФ и других ведомств, используемые в исследовательских целях для режимных обобщений и т. п., собираются в центры сбора с использованием почтовой связи в виде отчетов на бумажных и технических носителях.

В последние десять лет количество отчетов об экспедиционных исследованиях, поступающих в центры сбора данных, резко сократилось.

По оценкам специалистов Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ), который выполняет функции Национального центра океанографических данных (НЦОД) России, и куда собираются все данные океанографических исследований России, НИЦ ГНИНГИ располагает примерно 70% данных

судовых океанографических исследований, имеющихся в Национальном центре океанографических данных России.

При этом доля наблюдений собственно Гидрографической службы ВМФ в общем объеме российских данных составляет около 14%.

В состав информационных ресурсов НИЦ ГНИНГИ МО входят следующие компоненты:

- архив объемом более 12 тысяч отчетов;
- каталог со сведениями более 21 тыс. экспедиций;
- массивы и дисциплинарные базы данных Гидрографической службы ВМФ, а также массивы и базы данных, полученные как от мореведческих организаций страны, так и от зарубежных организаций по международному обмену данными в поквдратном и порейсовом виде;
- база метаданных Гидрографической службы ВМФ;
- климатические и специализированные информационно-справочные системы;
- база данных наблюдений за уровнем моря, выполненных Гидрографической службой ВМФ в Баренцевом, Белом, Охотском, Беринговом и Японском морях;
- база данных сейсмических зондирований со льда в Арктическом бассейне;
- программные модули подсистемы проблемно-ориентированных приложений.

Состав массивов и дисциплинарных данных НИЦ ГНИНГИ МО:

- судовая метеорология и аэрология;
- глубоководные гидролого-гидрохимические наблюдения;
- батитермографные наблюдения и температурное зондирование;
- течения;
- инструментальное волнение;
- гравиметрические и магнитометрические наблюдения;
- сейсмоакустическое зондирование с дрейфующего льда в Арктике.

Для поддержания БОД в актуальном состоянии в НИЦ разрабатывается технология его ведения на современных вычислительных средствах.

Условно технологии обработки, анализа и распространения данных о состоянии морской среды НИЦ ГНИНГИ МО можно разделить на:

- технологии первичной обработки, переформатирования, контроля качества, слияния, накопления и архивации данных на технических носителях;
- технологии работы с базами данных, выборки, создания пользовательских баз, выполнения запросов, получения режимно-справочной продукции;

– специализированные программные средства для работы с базами данных, специальной обработки, подготовки специализированной информационной продукции.

Основными компонентами банка океанографических данных НИЦ являются подсистемы архивного банка данных, интегрированных баз данных и подсистема проблемно-ориентированных приложений.

Интегральная характеристика созданных баз (массивов) данных НИЦ ГосНИНГИ по отдельным категориям информационных ресурсов включает:

1. Наименование вида информации

– справочные сведения (кодификаторы параметров, судов, стран, методов, географических областей, приборов и т. п. – всего 19 словарей; база справочных сведений о рейсах, районах исследований, наблюдениях, выполненных в рейсах);

– поквadratные дисциплинарные океанографические массивы данных (судовая метеорология, аэрология, батитермографные наблюдения и температурное зондирование, глубоководные гидролого-гидрохимические наблюдения);

– течения по регионам Мирового океана;

– сейсмические измерения;

– результаты статистической и специальной обработки (оценки классических статистических характеристик, специальные характеристики природной среды – по судовым метеорологическим наблюдениям, глубоководной гидрологии, течениям).

2. Состав дисциплинарных данных

– судовая метеорология (температура, влажность и давление воздуха, скорость и направление ветра, характеристики волнения, ледовой обстановки, метеорологические явления);

– глубоководные гидролого-гидрохимические наблюдения (вертикальные профили температуры и солености воды, гидрохимических параметров);

– батитермографные наблюдения и температурное зондирование (вертикальное распределение температуры воды, измеренное с помощью батитермографов и термозондов);

– течения (временные ряды скорости и направления течений на горизонтах наблюдений) – только НИЦ ГНИНГИ;

– инструментальное волнение – только НИЦ ГНИНГИ;

– сеймика (данные сейсмозондирований с дрейфующего льда) – только НИЦ ГНИНГИ.

3. Общий период наблюдений

1850 – 2005 гг.

4. Объем

- объем накопленных в НИЦ данных, поступивших от судов гидрографической службы ВМФ, составляет 1 775 экспедиций за период с 1923 по 2003 гг.;
 - общий объем накопленной информации без учета данных, полученных в рамках МООД, составляет 12 000 рейсов (около 6 000 Мб);
 - всего 1,5 млн. глубоководных гидрологических станций (0,85 млн. ст. – на МЛ ЕС ЭВМ и компакт дисках);
 - всего 0,7 млн. батитермографных станций (0,32 млн. ст. – на МЛ ЕС ЭВМ и компакт дисках);
 - всего 10 тыс. временных рядов наблюдений за течениями на буйковых станциях (4 тыс. – на МЛ ЕС ЭВМ и компакт дисках);
 - всего 20 млн. сроков судовых метеорологических наблюдений (19 млн. – на МЛ ЕС ЭВМ и компакт дисках);
 - всего 120 тыс. радиозондирований атмосферы (13,5 тыс. – на МЛ ЕС ЭВМ и компакт дисках);
 - 5,5 млн. гравиметрических пунктов наблюдений;
 - 7,6 млн. точек магнитометрических наблюдений;
 - 120 тыс. сейсмических зондирований.
- 40% информации ВМФ не занесено в массивы данных.

5. Судовые метеорологические наблюдения

Результаты судовых метеорологических наблюдений, которыми располагает НИЦ, относятся в основном к периоду 1955–1987 гг. Ряд окраинных морей России, а также районы северной части Атлантического океана, Средиземного Красного, Норвежского и Гренландского морей, морей юго-восточной Азии достаточно хорошо освещены данными наблюдений. В то же время по Северному морю, районам Тихого, Индийского океанов и южного полушария в целом, данных судовых метеорологических наблюдений, хранящихся в НИЦ ГНИНГИ МО, недостаточно. В настоящее время из ВНИИГМИ-МЦД поступили данные судовых наблюдений по всему Мировому океану за период с 1980 по 2000 год. Данные находятся в стадии конвертирования и после проверки качества будут включены в базы метеорологических наблюдений.

6. Глубоководные гидрологические наблюдения

Пространственное распределение данных гидрологических наблюдений, хранящихся в НИЦ в виде поквadratных массивов данных, более однородное, однако их основная доля относится к тому же периоду, что и

метеорологические наблюдения. Отметим, что часть материалов, не прошедших формальные процедуры контроля качества данных по отдельным районам океана, не учтена при оценке пространственного распределения гидрологических наблюдений.

7. Течения

Сведения о течениях в Мировом океане представляют особый интерес ввиду их существенного влияния на многообразные виды морской деятельности. Однако, в связи с трудоемкостью инструментальных измерений течений доля этих данных в общем объеме любого банка океанографических данных невелика.

База данных по течениям сформирована на персональном компьютере под управлением СУБД Access. Формирование базы данных осуществлялось с применением технологического процесса перезаписи данных с магнитных лент в виде текстовых файлов в макете архивного хранения на накопителях на жестких магнитных дисках.

В настоящее время база данных содержит данные по 3049 станциям наблюдений за течениями, выполненными в период с 1951 по 2003 гг. Основное количество станций выполнено в северных частях океанов и в проливных зонах. В южных частях океанов и в западной части Тихого океана наблюдения единичны.

За последний период сформированы стартовые версии баз порейсовых данных гидрологических и батитермографных наблюдений.

Общий объем накопленных в НИЦ данных, поступивших от судов Гидрографической службы ВМФ, составляет 1775 экспедиций за период с 1923 по 2003 гг. В базе данных содержится 46 600 станций за период с 1930 по 2003 гг.

База данных батитермографных наблюдений, созданная под управлением СУБД Access, содержит 495 экспедиций за период с 1961 по 1998 гг. Общее количество станций в базе составляет 98500, из которых 85% выполнены судами ГС ВМФ и 15% – другими организациями.

К настоящему времени на технические носители переведено около 50% информации.

На основе имеемых в НИЦ ГНИНГИ МО океанографических данных ГУНиО МО издано ряд гидрометеорологических карт, атласов и специальных пособий для ВМФ, данные НИЦ широко используются НИУ ВМФ, а также в практике гидрометеорологического обеспечения ВМФ. В последние годы на их основе в НИЦ разработаны Информационно-справочные системы по гидрометеорологическому режиму ряда морских акваторий.

Ниже представлены фрагменты моделирования отдельных характеристик состояния природной среды (рис. 1), создания интегрированных баз данных (рис. 2) и разработанных специализированных информационных систем, позволяющих производить комплексную

океанографическую характеристику заданного района в различных прикладных целях (рис. 3–6).

Общим недостатком созданных информационно-справочных систем является то, что они, естественно, не могут заменить полноценные базы океанографических данных, и каждый раз при сколько-нибудь заметном (на 10–20%) пополнении баз данных новыми наблюдениями, должен быть выполнен пересчет статистических характеристик.

Ввиду недостатка данных отдельных видов наблюдений (течения, волнение) для статистических обобщений требуется разработка технологии получения оценок статистических характеристик параметров состояния океана на основе использования методов численного гидродинамического моделирования. Включение такого рода модулей в информационно-справочные системы БОД является характерной тенденцией разработки современных информационно-справочных океанографических систем как за рубежом, так и в нашей стране.

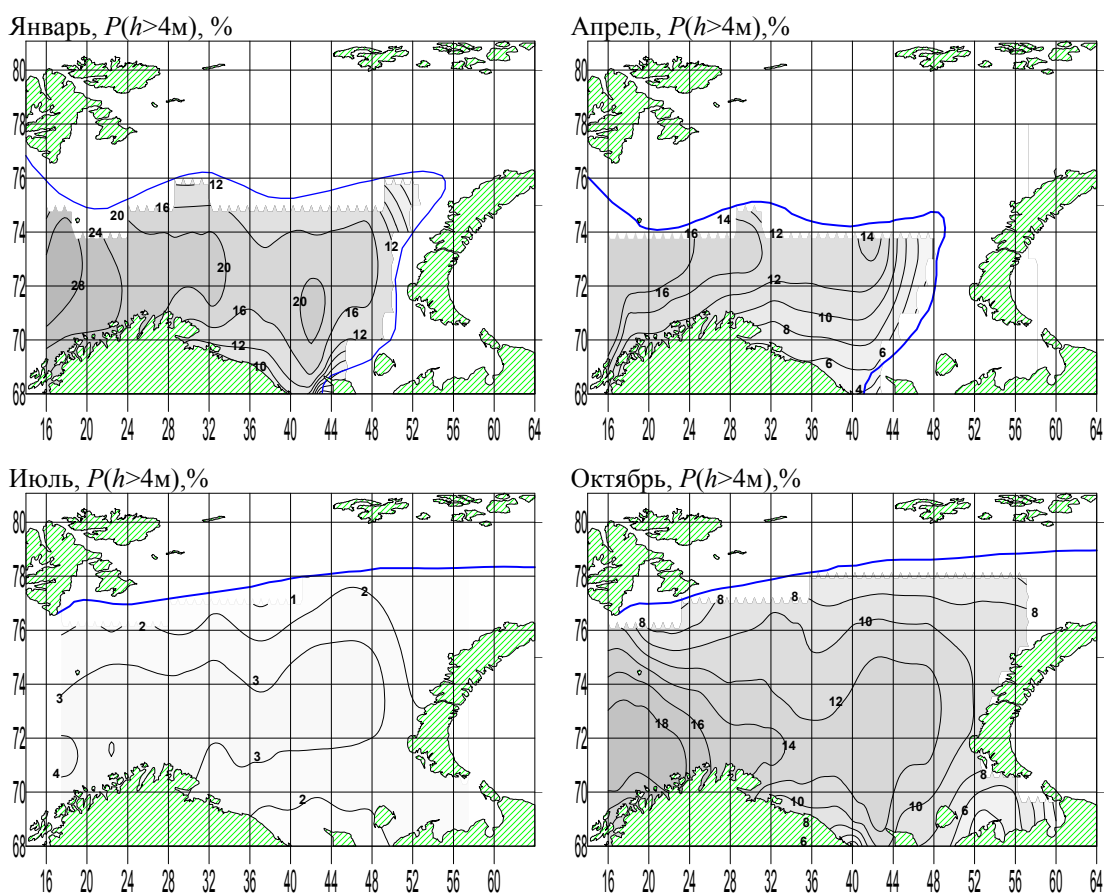


Рис. 1. Расчетная вероятность P волнения с высотой волн h свыше 4 м для Баренцева моря по сезонам

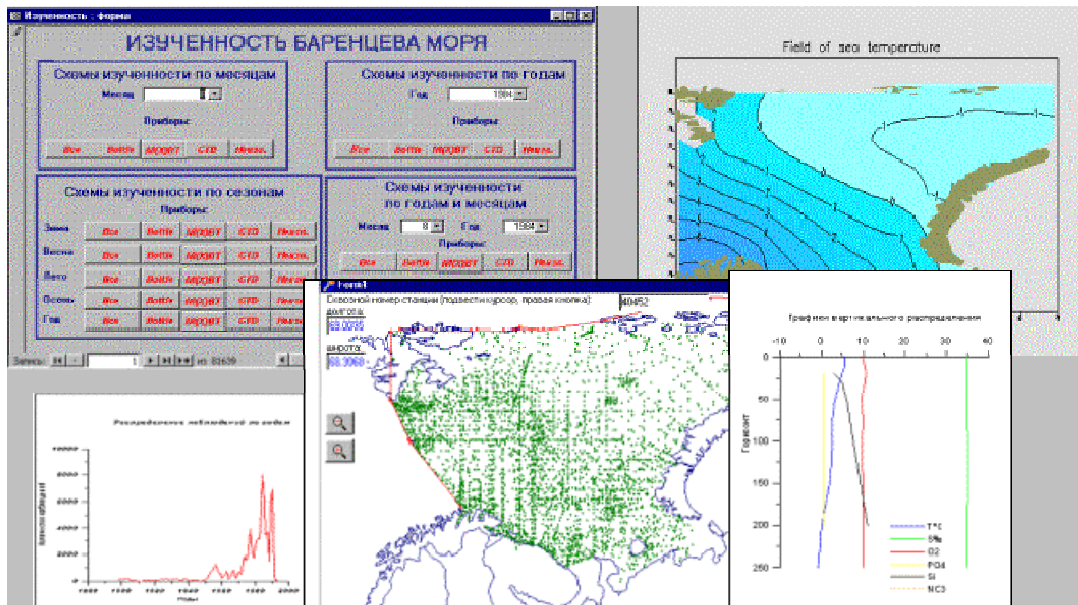


Рис. 2. Интегрированные базы океанографических данных

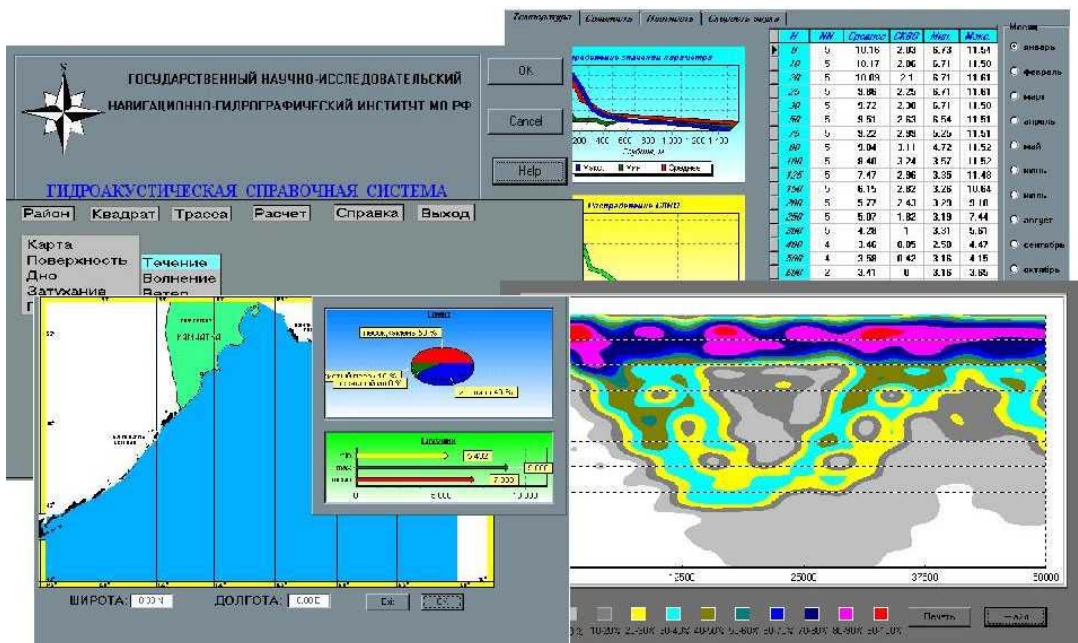


Рис. 3. Специализированная информационно-справочная система

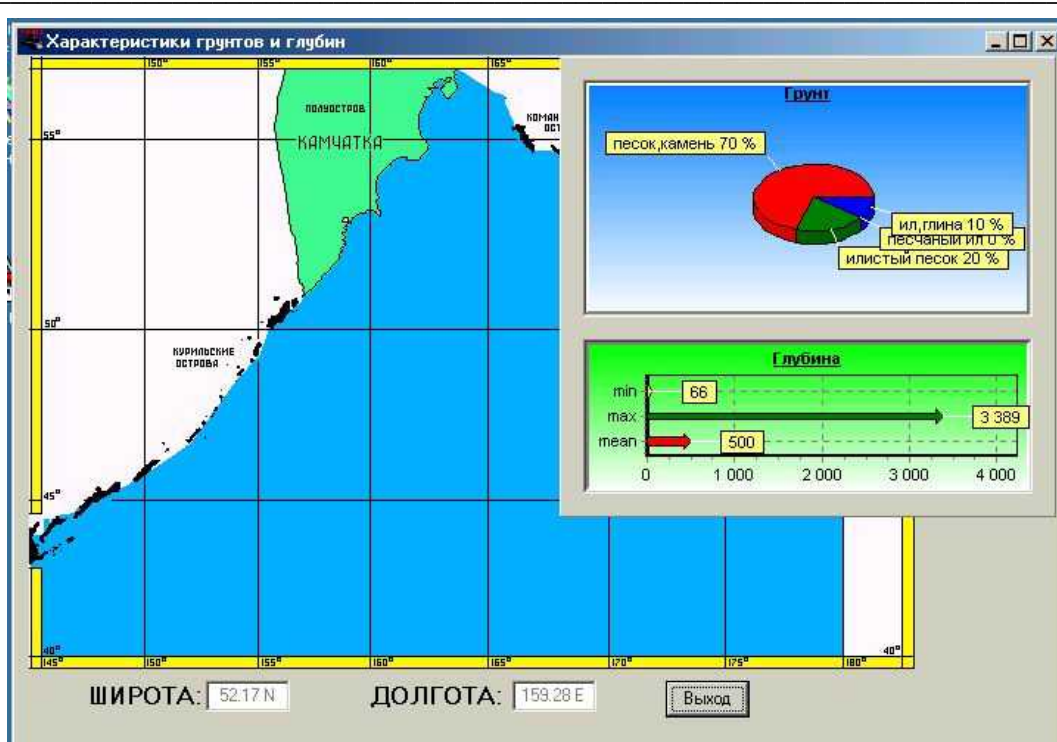


Рис. 4. Пример представления информации о грунтах и глубинах

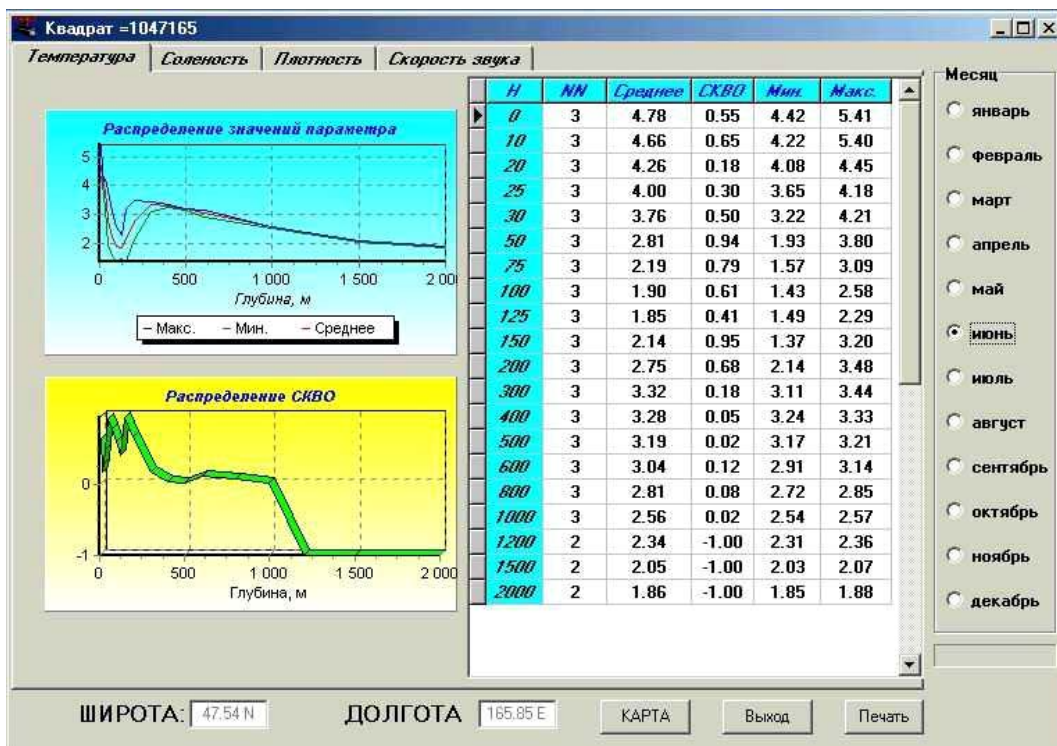


Рис. 5. Пример представления информации о гидрологических параметрах

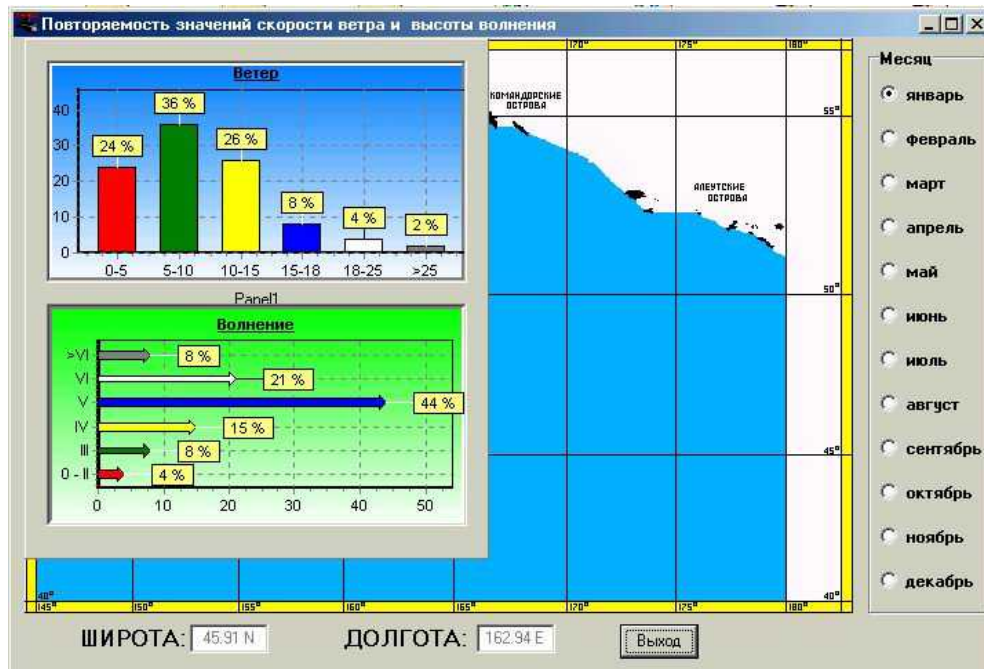


Рис. 6. Пример представления информации о ветре и волнении моря

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Данные океанографических наблюдений ВМФ должны пройти основные процедуры контроля качества. Для этого базы данных ВМФ должны быть переведены в порейсовый вид.
2. Для эффективного управления данными должна быть создана полноценная база метаданных по всем наблюдениям, хранящимся в НИЦ.
3. Ввиду резкого роста спроса на данные судовых метеорологических наблюдений требуется принятие срочных мер по пополнению баз судовых метеорологических наблюдений.
4. В связи с резким сокращением интенсивности океанографических исследований ВМФ при создании интегрированных и пользовательских баз данных должны привлекаться доступная информация, распространяемая международным океанографическим сообществом, в том числе размещенная в сети Интернет, а также шире использоваться возможности международного межведомственного, внутриведомственного и двухстороннего обмена океанографической информацией.
5. Ввиду недостатка отдельных видов наблюдений в НИЦ должны разрабатываться методики расчета характеристик состояния океана, основанные на результатах собственных исследований или на методах рекомендованных для применения международным океанографическим сообществом, Росгидрометом и прошедших необходимые процедуры верификации.

6. Разработанные методы ведения банка данных, обработки результатов наблюдений, специальных расчетов должны быть построены на единой методической основе и интегрированы в единую технологию, соответствующую рекомендуемой проектантами ЕСИМО.
7. Для выполнения возложенных на НИЦ функций банк данных НИЦ должен состоять из подсистемы архивных баз данных, подсистемы интегрированных баз данных и подсистемы проблемно-ориентированных приложений.
8. Технологию формирования и ведения БОД НИЦ должна представлять собой набор автоматизированных рабочих мест (АРМ), реализующих основные этапы его формирования, ведения и управления:
 - АРМ ведения базы метаданных;
 - АРМ занесения первичной информации;
 - АРМ контроля качества занесенных данных;
 - АРМ ведения дисциплинарных баз экспедиционных данных (судовая метеорология, глубоководная гидрология, батитермография, течения);
 - АРМ создания интегрированных баз данных;
 - АРМ формирования баз дисциплинарных данных на основе оперативных наблюдений;
 - АРМ обработки, моделирования и визуализации результатов расчета.
9. Для полноценной реализации основных элементов технологии БОД должен быть оснащен современными аппаратно-программными средствами и интегрирован в систему АС ГМО ВМФ и ЕСИМО.

Реализация сформулированных перспективных направлений, являющихся важными элементами развития системы навигационно-гидрографического обеспечения Морской деятельности России, проходит в рамках создания Единого Центра данных океанографических и гидрографических исследований Мирового океана Министерства обороны РФ. При этом большую роль в осуществлении этого проекта играет поддержка руководителя Департамента государственных целевых программ и капитальных вложений Минэкономразвития Российской Федерации Ю. М. Колочкова. Завершение создания Центра позволит приступить к реализации информационной поддержки крупных отечественных проектов и программ на современном научно-техническом уровне.

Prospects for Development of the Navy Oceanographic Data Bank

A.B. OPARIN, A.Y. USTIMENKO
(GNINGI, RF MoD)

Based on the experience accumulated at the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD (GNINGI RF MoD), the composition, status and prospects for development of the oceanographic data bank of the Research Centre, GNINGI RF MoD, are reviewed; the general information about the work that has been carried out and the experience gained set forth.

ИНФОРМАЦИЯ

В период 13–15 октября 2006 г. в Венеции проходил Симпозиум морских держав. В нем участвовали Главнокомандующие ВМФ стран Средиземного и Черного морей: России, Франции, Марокко, Греции, Турции, Грузии и др.

Президент МГО адмирал Александрос Маратос направил в связи с этим письмо Начальнику Главного управления Навигации и океанографии МО РФ. Ниже приводится текст письма (русский перевод).

Кому: контр-адмиралу С. В. Козлову
Начальнику Главного управления
навигации и океанографии МО РФ
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

МГБ файл №31/3048

26 октября 2006 г.

Уважаемый Адмирал,

Прежде всего позвольте мне снова поздравить Вас с назначением на должность начальника Главного управления Навигации и океанографии. Я уверен, что те прекрасные отношения, которые существуют между Международной гидрографической организацией и ГУНиО МО, сохранятся в период Вашего руководства Управлением.

Исходя из телефонного разговора с капитаном 1 ранга В. М. Соболевым я хотел бы сообщить Вам, что в период Симпозиума морских держав в Венеции, куда я был приглашен и где сделал доклад о деятельности международной Гидрографической организации, я познакомился с Главнокомандующим Вашего Военно-Морского Флота адмиралом В. В. Масориным и его супругой. Я коротко рассказал ему о деятельности МГО, о важном участии в ней вашего Управления и о большом вкладе, которое оно вносит в работу Международной гидрографической организации.

Я также сообщил ему о том, что в следующем году состоится Конференция МГО, и попросил рассмотреть возможность его участия в ней.

На ужине, устроенном вечером в последний день симпозиума, мы сфотографировались, и копию фотографии я специально высылаю для Вас. Другой джентльмен на фотографии – командующий ВМФ Франции. Здесь же я прилагаю письмо с той же фотографией и короткой запиской.

Хотел бы попросить Вас передать письмо адмиралу В. Масорину.

Надеюсь, что мы снова вскоре встретимся.

Искренне Ваш

Вице-адмирал Александрос Маратос,
Президент МГО

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

АЛЕКСЕЕВ Сергей Петрович, начальник ГНИНГИ МО РФ, заслуженный военный специалист РФ, председатель СПб регионального отделения Российского общественного института навигации, академик Академии транспорта РФ, контр-адмирал, докт. техн. н. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – штурман. Автор более 300 печатных трудов.

БАРИНОВ Андрей Сергеевич, начальник топогеодезической партии 30 гидрографического отряда ГС Северного флота, капитан-лейтенант. Окончил Морской корпус Петра Великого – Санкт-Петербургский военно-морской институт. Сфера научных интересов – гидрографические исследования. Автор одной научной публикации.

БАРИНОВ Сергей Прокопьевич, помощник главного директора ОАО Российский институт радионавигации и времени, канд. техн. наук. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе. Специализация – радионавигация. Автор более 60 печатных трудов.

БАХМУТОВ Владимир Юрьевич, начальник отдела ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – штурман.

БЕЛЯЕВ Борис Николаевич, главный научный сотрудник ГНИНГИ, капитан 2 ранга в отставке, докт. техн. н., профессор. Окончил Каспийское высшее военно-морское училище, ВС офицерские курсы ВМФ, ВМА. Специализация – гидрометеорология. Автор более 100 печатных трудов.

БЫСТРОВ Валерий Николаевич, научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, старший лейтенант. Окончил Морской корпус Петра Великого – Санкт-Петербургский военно-морской институт. Специализация – спутниковые радионавигационные системы. Автор двух печатных работ.

Sergey P. ALEKSEYEV, Chief of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Rear-Admiral, DSc, Honoured Military Specialist, chairman of St. Petersburg regional branch of the Russian Public Institute of Navigation, member of the Academy of Transport, RF. Graduated from Frunze Naval College and Kuznetsov Naval Academy. Speciality: navigation. Author of more than 300 publications.

Andrei S. BARINOV, Chief of topographic-geodetic party, 30 Hydrographic Unit, the Hydrographic Service of the North Fleet, Lieutenant-Commander. Graduated from St. Petersburg Naval Institute. The sphere of interests: hydrographic explorations. Author of one publication.

Sergei P. BARINOV, Assistant of Director General, the Russian Institute of Radionavigation and Time, CandSc. Graduated from Frunze Naval College, Speciality: radionavigation. Author of more than 60 publications.

Vladimir Y. BAKHMUTOV, Chief of division, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Captain 1-st rank, Graduated from Frunze Naval College and Kuznetsov Naval Academy. Speciality: navigation.

Boris N. BELYAEV, chief scientist, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, Captain 2-nd rank (Ret.), DSc, professor. Graduated from Caspian Naval College, Higher Naval Officers Courses, Naval Academy. Speciality: hydrometeorology. Author of more than 100 publications.

Valery N. BYSTROV, researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Senior Lieutenant. Graduated from St. Petersburg Naval Institute. Speciality: radionavigation systems. Author of two publications.

ГОРШКОВ Валерий Николаевич, старший научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга в отставке. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Академические курсы офицерского состава. Специализация : гидрография. Автор более 20 печатных работ.

ЗУБЧЕНКО Эдуард Семенович, преподаватель Военно-морской академии, капитан 1 ранга в отставке, докт. техн. н., старший научный сотрудник. Окончил высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – гидрография, аэрокосмические методы сбора гидрографической информации. Автор 45 печатных трудов.

ИВАНОВ Борис Евгеньевич, главный научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга в отставке, докт. техн. н., профессор, лауреат Государственной премии РФ, заслуженный деятель науки и техники, председатель секции НТО им. акад. А. Н. Крылова. Окончил Балтийское высшее военно-морское училище, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – морская геодезия, гравиметрия, гидрография, навигация. Автор более 200 печатных трудов.

ИВАНОВ Николай Евгеньевич, научный сотрудник Санкт-Петербургского отделения Государственного океанографического института. Окончил Ленинградский гидрометеорологический институт. Специализация – инженер-океанолог. Автор более 20 печатных трудов.

ИЛЮЩЕНКО Григорий Иванович, начальник лаборатории ГНИНГИ МО РФ, капитан 2 ранга. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе. Специалист в области гидрометеорологического обеспечения сил и средств ВМФ. Автор 12 опубликованных работ и двух патентов.

КАПУСТИН Игорь Владимирович, заместитель начальника управления ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – военный инженер-штурман. Автор около 40 печатных трудов.

Valery N. GORSHKOV, senior researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF. Captain 1-st rank (Ret.). Graduated from Frunze Naval College and Academy Officers' Courses. Speciality: hydrography. Author of more than 20 publications.

Edward S. ZUBCHENKO, teacher, Kuznetsov Naval Academy, DSc, senior researcher, Captain 1-st rank (Ret.). Graduated from Frunze Naval College, the Naval Academy. Speciality: hydrography, aerospace methods of collecting the hydrographic information. Author of 45 publications.

Boris E. IVANOV, chief researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF, Captain 1-st rank (Ret.), DSc, professor, RF State Prize Winner, Honoured Scientist, chairman of Krylov STO section. Graduated from Baltic Naval College and Naval Academy. Speciality: marine geodesy, gravimetry, hydrography, navigation. Author of more than 200 publications.

Nikolai E. IVANOV, researcher, St. Petersburg branch, State Oceanographic Institute. Graduated from St. Petersburg Hydrometeorological Institute. Speciality: oceanology. Author of more than 20 publications.

Grigory I. ILYSHCHENKO, chief of laboratory, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD. Captain 2-nd rank. Graduated from Frunze Naval College. Sphere of scientific interests: hydrometeorological support for forces and means of the Navy. Author of 12 publications and two patents.

Igor V. KAPUSTIN, Deputy Chief of department, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Captain 1-st rank, Graduated from Frunze Naval College and Kuznetsov Naval Academy. Speciality: military engineer-navigator. Author of about 40 publications..

КЛЕВАНЦОВ Юрий Петрович, и. о. заведующего лабораторией Санкт-Петербургского отделения Государственного океанографического института. Окончил Ленинградский государственный университет. Область научных интересов – океанология. Автор более 60 печатных трудов.

ЛОБОЙКО Борис Иванович, ведущий научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга в запасе, докт. техн. н., академик Академии военных наук, почётный геодезист. Окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники им. С. Попова. Специализация – радиосвязь, навигация. Автор более 70 печатных трудов.

МАЛЕЕВ Павел Иванович, ведущий научный сотрудник ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга в отставке, докт. техн. н. Окончил Казахский государственный университет, Специальные курсы при Военно-морской академии им. А. Н. Крылова. Специализация – технические средства навигации. Автор более 220 печатных трудов.

МИХАЛЬСКИЙ Виталий Александрович, старший научный сотрудник ГНИНГИ, капитан 1-го ранга в отставке, канд. техн. н., доцент. Окончил Высшее военно-морское училище подводного плавания. Специализация: прикладная теория вероятностей и метрология в задачах кораблевождения. Автор более 180 печатных трудов.

ОПАРИН Александр Борисович, начальник НИЦ ГНИНГИ МО РФ, капитан 1 ранга, докт. техн. н., старший научный сотрудник. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Высшие специальные офицерские классы. Специализация – военный инженер-гидрограф. Автор около 120 печатных трудов.

РЕШЕТНЯК Сергей Витальевич, главный инженер ФГУП «Гидрографическое предприятие», канд. т. н. Окончил Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова. Область научных интересов – гидрографические исследования в Арктике. Автор 30 научных публикаций.

РОЖКОВ Валентин Алексеевич, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского отделения Государственного океанографического института, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, докт. физ.-мат. н. Окончил Ленинградский государственный университет. Область научных интересов – океанология. Автор 265 печатных трудов.

Yuri P. KLEVANTSOV, acting head of laboratory, State Oceanographic Institute, St. Petersburg branch Graduated from Leningrad State University. Speciality: oceanology. Author of more than 60 publications.

Boris I. LOBOIKO, leading researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF. Captain 1st rank (Ret.), DSc, academician of the Academy of Military Sciences, Honoured Geodesist. Graduated from Popov Naval College of Radioelectronics. Speciality: radio communications, navigation. Author of more than 70 publications.

Pavel I. MALEYEV, leading researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF. Captain 1st rank (Ret.), DSc. Graduated from Kazakh State University, Specialized Course at Krylov Naval Academy. Speciality: technical means of navigation. Author of more than 200 publications.

Vitaly A. MIKHALSKY, senior researcher, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, CandSc, Senior reader, Captain 1-st rank (Ret.). Graduated from Naval College of Submerged Sailing. Speciality: applied probabilities theory and metrology used for ship navigation. Author of more than 180 publications.

Alexander B. OPARIN, chief of Research Centre, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, RF MoD, Captain 1-st rank, senior researcher, DSc. Graduated from Frunze Naval College and Higher Officers' Classes. Speciality: military engineer-hydrographer. Author of about 120 publications.

Sergei V. RESHETNYAK, Chief engineer, the Federal State Unitary Enterprise «Hydrographic Enterprise», CandSc. Graduated from Leningrad Higher Engineering Marine College. Speciality: engineer-hydrographer. Sphere of scientific interests: hydrographic explorations in the Arctic. Author of 30 publications.

Valentin A. ROZHKOV, chief researcher, State Oceanographic Institute, St. Petersburg branch; professor, St. Petersburg State University, DSc. Graduated from Leningrad State University. Sphere of scientific interests: oceanology. Author of 265 publications.

СМИРНОВ Борис Михайлович, старший научный сотрудник АОЗТ «Криомаг», канд. техн. н. Окончил Московский энергетический институт. Специализация – магнитометрия. Автор более 100 печатных трудов.

ТЕЗИКОВ Александр Львович, начальник кафедры Государственной морской академии им. адм. С. О. Макарова, докт. техн. н., профессор. Окончил Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова. Область научных интересов – гидрографические исследования в Арктике. Автор 90 научных публикаций.

ТЮЛЬКИН Михаил Викторович, адъюнкт высшей адъюнктуры Высших специализированных классов ВМФ. Окончил Морской корпус Петра Великого – Санкт-Петербургский военно-морской институт. Специализация: инерциальная навигация, кораблевождение. Автор трех научных публикаций.

УСТИМЕНКО Алексей Юрьевич, начальник лаборатории ГНИНГИ, капитан-лейтенант. Окончил Севастопольский государственный технический университет в 1996. Специализация – инженер-системотехник. Автор более 10 печатных трудов.

ФИРСОВ Юрий Георгиевич, доцент Государственной морской академии им. адм. С. О. Макарова, канд. техн. н. Окончил Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова. Специализация: гидрография, морская геоматика, геоинформатика. Автор более 60 печатных трудов.

ХРЕБТОВ Альберт Александрович, директор по научной работе ОАО НТП «НАВИ-ДАЛС», канд. военно-мор. наук. Окончил Североморское высшее военно-морское училище. Специальность: штурман. Автор 65 публикаций.

ЧУМАКОВ Александр Юрьевич, начальник отдела, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского управления. Окончил Высшее военно-морское училище подводного плавания, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова, Академические курсы офицерского состава. Специализация: навигационные комплексы подводных лодок. Автор 22 печатных трудов.

Boris M. SMIRNOV, senior researcher, «Criomag» Closed JSC, CandSc. Graduated from Moscow Energetics Institute. Speciality: magnetometry. Author of more than 100 publications.

Alexander L. TEZIKOV, Chief of department «Hydrography of Sea», Makarov State Maritime Academy, DSc, professor. Graduated from Leningrad Higher Engineering Marine College. Speciality: engineer-hydrographer. Sphere of scientific interests: hydrographic explorations in the Arctic. Author of 90 publications.

Mikhail V. TYULKIN, post-graduate student of the Higher Special Officers' Classes. Graduated from St. Petersburg Naval Institute. Speciality: inertial navigation, marine navigation. Author of three publications

Aleksei Y. USTIMENKO, chief of laboratory, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF, Lieutenant-Commander. Graduated from Sevastopol State Technical University (1996). Speciality: design engineering. Author of more than 10 publications.

Yuri G. FIRSOV, reader, department «Hydrography of the Sea», Makarov State Maritime Academy, CandSc. Graduated from Leningrad Higher Engineering Marine College. Speciality: engineer-hydrographer. Sphere of scientific interests: hydrography, marine geomatics, geoinformatics. Author of more than 60 publications.

Albert A. KHREBTOV, Director for Research, STE «NAVI-DALS» JSC, CandSc. Graduated from Severomorsk Naval College. Speciality: navigator. Author of 65 publications.

Alexander Y. CHUMAKOV, Chief of division, leading researcher of Research Department. Capitan 1-st rank. Graduated from the Naval College of Submerged Sailing, Kuznetsov Naval Academy, the Academy Officers' Courses. Speciality: navigational systems of submarines. Author of 22 publications.

ШЕРЕМЕТ Виктор Иванович, руководитель лаборатории измерения магнитных полей во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева. Окончил Харьковский государственный университет. Специализация – магнитные измерения, сверхпроводимость, криогенная техника. Автор более 90 печатных трудов в том числе двух монографий.

Victor I. SHEREMET, head of the laboratory for magnetic fields measurements, Mendeleyev All-Union Research Institute of Metrology. Graduated from Kharkov State University. Speciality: magnetic measurements, superconductivity, cryogenic technology. Author of more than 90 publications, including two monographs.