

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

---

**НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ**

ИЗДАЕТСЯ С 1995 ГОДА

**13  
2001**

**МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

Санкт-Петербург

# **Главный редактор д.т.н. С. П. Алексеев**

## **Редакционная коллегия:**

В. А. Авдонюшкин, к.т.н. С. П. Баринов, д.т.н. Б. Н. Беляев,  
М. Л. Богданович, д.в.н. П. Г. Бродский (заместитель главного редактора),  
к.г.-м.н. И. Ю. Бугрова (редактор), к.в.-м.н. А. А. Дадашев, к.т.н. В. Г. Дзюба,  
д.т.н. А. Н. Добротворский (первый заместитель главного редактора),  
к.т.н. А. В. Зинченко (ответственный за выпуск), д.т.н. Б. Е. Иванов,  
к.т.н. И. В. Капустин, к.т.н. И. В. Козырь, к.т.н. А. А. Лакунин,  
к.ф.-м.н. П. И. Малеев, к.т.н. С. И. Мاستрюков, д.в.-м.н. А. П. Михайловский,  
д.т.н. Н. Н. Неронов, к.т.н. А. Б. Опарин, д.т.н. В. И. Пересыпкин,  
акад. РАН В. Г. Пешехонов, к.т.н. Ю. В. Румянцев,  
чл.-кор. РАН А. Е. Сазонов, чл.-кор. РАН А. И. Сорокин

**© Государственный научно-исследовательский  
навигационно-гидрографический институт Министерства обороны РФ**

**2001**

**THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC  
INSTITUTE**

---

**NAVIGATION AND HYDROGRAPHY**

PUBLISHED SINCE 1995

**13  
2001**

**RUSSIAN FEDERATION MINISTRY OF DEFENCE**

---

Saint-Petersburg

# **Editor-in-chief**

## **S.P. Alekseyev, DSc**

### **Editorial board**

V. Avdonyushkin; S. Barinov, CandSc;  
B. Belyaev, DSc; M. Bogdanovich; P. Brodsky (vice-editor-in-chief), DSc;  
I. Bugrova, CandSc (editor); A. Dadashev, CandSc; V. Dzyuba, CandSc;  
A. Dobrotvorsky (first vice-editor-in-chief), DSc;  
A. Zinchenko (the issue manager), CandSc; B. Ivanov, DSc;  
I. Kapustin, CandSc ; I. Kozyr, CandSc; A. Lakunin, CandSc;  
P. Maleyev, CandSc; S. Mastryukov, CandSc; A. Mikhaylovsky, DSc;  
N. Neronov, DSc; A. Oparin, CandSc; V. Peresypkin, DSc;  
V. Peshekhonov DSc, Acad. RAS; Yu. Rumyantsev, CandSc;  
A. Sazonov, CM RAS; A. Sorokin, DSc, CM RAS

© The State Research Navigation-Hydrographic Institute RF Ministry of Defense

2001

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ОБЩИЕ ВОПРОСЫ</b> .....	9
<b>А. А. Комарицын, С. П. Алексеев, П. Г. Бродский, В. Г. Дмитриев, А. Н. Добротворский</b> Навигационно-гидрографическое и гидрометеорологическое обеспечение морской деятельности в аспектах устойчивого развития .....	9
<b>П. Г. Бродский, В. Г. Дмитриев, А. Н. Добротворский, М. И. Польская</b> Перспективы развития информационной инфраструктуры Арктического севера Российской Федерации.....	18
<b>В. А. Коугия</b> Геодезия на рубеже веков и тысячелетий .....	23
<b>МЕТОДЫ, ТОЧНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАВИГАЦИИ. ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ШТУРМАНА</b> .....	31
<b>Б. Е. Иванов</b> Влияние погрешностей положения кромок фарватера на вероятность навигационной безопасности плавания.....	31
<b>Н. И. Леденев</b> О новой возможности юстировки бортовых измерителей скорости подводной лодки .....	38
<b>А. Л. Голубева, Т. В. Сазонова</b> О построении трехмерного изображения местности на летательном аппарате .....	45
<b>НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ</b> .....	51
<b>М. Б. Солодовниченко, Ю. М. Устинов, А. Р. Шигабутдинов</b> Технические возможности универсальной автоматической информационной (идентификационной) системы (АИС).....	51
<b>СПУТНИКОВЫЕ И НАЗЕМНЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ</b> .....	68
<b>Ю. С. Дубинко</b> Останов поиска и захват радиосигналов навигационных спутников на сопровождение в приемнике - согласованном фильтре по критерию Вальда .....	68
<b>Г. А. Семенов, А. И. Кабиров, С. Б. Писарев</b> Алгоритм оценки аномальных вариаций фаз сигналов наземных станций радионавигационных систем диапазона ОНЧ в периоды ионосферных возмущений .....	80
<b>Ю. И. Никитенко</b> Принципы определения на судне центра масс по сигналам спутниковых радионавигационных систем.....	86
<b>Ю. И. Никитенко, Н. А. Иванов</b> Варианты алгоритмов определения оси вращения и центра масс судна по сигналам СРНС.....	91
<b>СРЕДСТВА НАВИГАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ МОРЕПЛАВАНИЯ, ВОЗДУШНЫХ ТРАСС И ПОРТОВ</b> .....	100
<b>Г. А. Калошин, А. Н. Мальцев</b> Новые источники света для зрительных СНО .....	100
<b>СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ГИДРОГРАФИИ, МОРСКОЙ КАРТОГРАФИИ И ГЕОФИЗИКИ</b> .....	110
<b>П. И. Малеев, А. П. Наумов, В. И. Шеремет</b> Естественные магнитные сигналы сейсмоисточников морского шельфа и особенности их приема.....	110

<b>П. И. Малеев, Б. М. Смирнов, И. С. Хасиев, В. И. Шеремет</b> К вопросу определения индукции геомагнитного поля с подвижного ферромагнитного объекта .....	114
<b>В. А. Бледнов</b> Об измерении силовых составляющих магнитного поля Земли с движущихся ферромагнитных носителей .....	117
<b>С. М. Усенков</b> Донные отложения и литодинамика верхней части шельфа северо-востока Сахалина .....	124
<b>ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОРЕПЛАВАНИЯ</b> .....	137
<b>А. И. Дуванин</b> Океаническое приливное лунно-солнечное время .....	137
<b>Ю. Н. Жуков</b> Артефакты цикличности часовых систем.....	143
<b>Ю. Н. Жуков, Е. В. Федорова</b> Аналитические принципы расчета приливных карт на основе теории функций комплексного переменного .....	147
<b>И. Л. Башмачников, Н. Е. Иванов, В. А. Рожков</b> Методы анализа приливных движений в морях .....	151
<b>С. И. Матрюков, А. Ю. Устименко</b> Анализ течений в южной части Баренцева моря.....	169
<b>ВОПРОСЫ ИСТОРИИ</b> .....	177
<b>П. Г. Бродский, Б. Е. Иванов, А. П. Васильев</b> О подготовке научных кадров высшей квалификации в области военной навигации, гидрографии, геофизики и гидрометеорологии.....	177
<b>ЮБИЛЕИ</b> .....	181
<b>ABSTRACTS</b> .....	183
<b>ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ</b> .....	188

# CONTENTS

<b>GENERAL MATTERS</b> .....	9
<b>A. A. Komritsyn, S. P. Alekseyev, P. G. Brodsky, V. G. Dmitriyev, A. N. Dobrotvorsky</b> Navigation-Hydrographic and Hydrometeorological Support for Maritime Activities in the Aspects of Stable Development.....	9
<b>P. G. Brodsky, V. G. Dmitriyev, A. N. Dobrotvorsky, M. I. Polskaya</b> Prospects of Development for the Information Infrastructure of the Russian Federation Arctic North .....	18
<b>V. A. Koughiya</b> Geodesy at the Turn of Centuries and Millenniums .....	23
<b>METHODS, ACCURACY AND EFFICIENCY OF NAVIGATION. NAVIGATOR'S ACTIVITIES</b> .....	31
<b>B. E. Ivanov</b> The Influence of Errors in Fairwater Boundary Position on the Navigation Safety Probability .....	31
<b>N. I. Ledenyov</b> On the New Possibility of Adjusting the Submarine Speed Sensors .....	38
<b>A. L. Golubeva, T. V. Sazonova</b> Provision of 3D Terrain Presentation on Board the Aircraft .....	45
<b>NAVIGATION SYSTEMS AND INTEGRATED SYSTEMS</b> .....	51
<b>M. B. Solodovnichenko, Y. M. Ustinov, A. R. Shigabutdinov</b> Technical Features of General-Purpose Automatic Information (Identification) System (AIS) .....	51
<b>SATELLITE AND GROUND-BASED RADIONAVIGATION SYSTEMS</b> .....	68
<b>Y. S. Doubinko</b> Halt of Search and Lock-on of Navigation Satellites Signals for Tracking in the Matched-Filter Receiver by the Wald Criterion .....	68
<b>G. A. Semyonov, A. I. Kabirov, S. B. Pisarev</b> Algorithm for Assessment of Abnormal Variations of Signal Phases of VLF Radionavigation Reference Stations in the Periods of Ionospheric Disturbances .....	80
<b>Y. I. Nikitenko</b> Principles of Determining the Vessel's Centre of Mass by the SRNS Signals .....	86
<b>Y. I. Nikitenko, N. A. Ivanov</b> Variants of Algorithms for Determining the Vessel's Rotation Axis and Centre of Mass by SRNS Signals .....	91
<b>AIDS TO NAVIGATION OF THE NEARSHORE NAVIGATION ZONE, AIR ROUTES AND PORTS</b> .....	100
<b>G. A. Kaloshin, A. N. Maltsev</b> New Light Sources for Visual Aids to Navigation .....	100
<b>MEANS AND METHODS OF HYDROGRAPHY, MARINE CARTOGRAPHY AND GEOPHYSICS</b> .....	110
<b>P. I. Maleyev, A. P. Naumov, V. I. Sheremet</b> Natural Magnetic Signals of the Sea Shelf Seismic Sources and Specific Features of Their Reception.....	110
<b>P. I. Maleyev, B. M. Smirnov, I. S. Khasiyev, V. I. Sheremet</b> On the Problem of Determination of the Geomagnetic Field Induction from a Moving Ferromagnetic Object .....	114

<b>V. A. Blednov</b> On Measurement of the Earth's Magnetic Field Force Components from Moving Ferromagnetic Carriers.....	117
<b>S. M. Usenkov</b> Bottom Sediments and Lithodynamics of the Upper Part of Shelf in the North-East of Sakhalin .....	124
<b>HYDROMETEOROLOGICAL SUPPORT OF MARINE NAVIGATION</b> .....	137
<b>A. I. Duvanin</b> Oceanic Tidal Lunar-Solar Time .....	137
<b>Y. N. Zhukov</b> Artifacts of Cyclic Clock Systems.....	143
<b>Y. N. Zhukov, E. V. Fedorova</b> Analytical Principles of Calculating the Tidal Charts Based on the Theory of Complex Variable Functions .....	147
<b>I. L. Bashmatchnikov, N. E. Ivanov, V. A. Rozhkov</b> Methods of Analysis of Tidal Movements in the Seas .....	151
<b>S. I. Mastryukov, A. Y. Ustimenko</b> Analysis of Currents in the Southern Area of the Barents Sea .....	169
<b>PAGES OF HISTORY</b> .....	177
<b>P. G. Brodsky, B. E. Ivanov, A. P. Vasilyev</b> Training the Highly-Qualified Scientists in the Field of Military Navigation, Hydrography, Geophysics, and Hydrometeorology.....	177
<b>JUBILEES</b> .....	181
<b>ABSTRACTS</b> .....	183
<b>INFORMATION ABOUT AUTHORS</b> .....	188



---

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

---

ГРНТИ 78.21.41

### **НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОЕ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В АСПЕКТАХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ**

**А. А. КОМАРИЦЫН,**  
(ГУНиО МО РФ)

**С. П. АЛЕКСЕЕВ,**

**П. Г. БРОДСКИЙ,**

**В. Г. ДМИТРИЕВ,**

**А. Н. ДОБРОТВОРСКИЙ**

(ГНИНГИ МО РФ)

*Статья посвящена международным аспектам сотрудничества в области навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения (НГ и ГМО) морской деятельности при освоении Мирового океана. В частности, необходимость создания адекватной системы НГ и ГМО определяется задачами освоения морских нефтегазовых месторождений на шельфе с учетом масштабов и сложности изыскательских и строительных работ и особенностей физико-географических и гидрометеорологических условий районов их проведения. Своевременное развертывание системы оперативного гидрометеорологического обеспечения чрезвычайно важно для удаленных акваторий и труднодоступных прибрежных зон независимо от национальных границ.*

#### **Введение**

Освоение пространств Мирового океана можно назвать одним из главных направлений развития мировой цивилизации в третьем тысячелетии. Многие говорят о том, что в XXI веке нужно ожидать более масштабного развертывания деятельности государств и организаций в Мировом океане с целью освоения его недр и природных ресурсов.

Поскольку Мировой океан определяет устойчивость биосферы в планетарном масштабе и, в конечном итоге, устойчивость развития нашей цивилизации, антропогенные процессы, воздействующие на природную морскую среду, являют собой предмет пристального внимания международной ответственности.

В Мировом океане концентрируются различные формы хозяйственной, научно-технической, гуманитарной, военной, политической активности государств, их союзов, международных организаций и пересекаются интересы субъектов морской деятельности.

Поэтому необходимость изучения и рационального использования его ресурсов экономически оправдана. Сейчас Мировой океан - это дополнительный, а в будущем, возможно, и основной, источник минеральных, биологических и других ресурсов, необходимых для социально-экономического

развития государств. Океан во многом определяет погоду и климат на планете. Морские коммуникации и транспортные системы являются самыми мощными и разветвленными в мире.

Российская Федерация, являясь полноправным членом мирового сообщества, относится с уважением к принципам и Уставу ООН, стремится соблюдать принятые нормы и требования Международного Морского права. Россия выполняла, выполняет и будет выполнять взятые на себя обязательства, достигнутые двусторонние и многосторонние договоренности.

За последние почти десять лет после Конференции ООН в Рио-де-Жанейро (июнь 1992 г.) Россия прошла достаточно сложный путь. В настоящее время деятельность правительственных органов и других институтов Российской Федерации во всех сферах направлена на переход к обеспечению устойчивого развития.

### **Государственные интересы России в Мировом океане**

На формирование государственных интересов Российской Федерации в Мировом океане оказывают влияние сложившиеся в мире тенденции в области изучения, освоения и использования Мирового океана, основными из которых являются [1]:

- возрастание роли Мирового океана в решении различными государствами и военно-политическими блоками важнейших для них задач в политической, военно-стратегической, экономической, социальной, научной, культурной и других сферах;
- обострение конкуренции между развитыми странами мира за доступ к ресурсам Мирового океана и стремление к контролю его стратегически важных районов и зон;
- усиление влияния военно-морского потенциала государств, в том числе ядерного, на соотношение сил в мире, сохранение стратегической стабильности, ход и исход войн и вооруженных конфликтов;
- углубление мировой интеграции и международного разделения труда на мировом рынке морских товаров и услуг.

В политической сфере государственные интересы Российской Федерации в Мировом океане предусматривают:

- обеспечение гарантированного доступа Российской Федерации к ресурсам и пространствам Мирового океана, исключение дискриминационных действий в отношении ее или ее союзников со стороны отдельных государств или военно-политических блоков;
- недопущение доминирования в пространствах Мирового океана каких-либо государств или военно-политических блоков, имеющих значение для реализации государственных интересов Российской Федерации, особенно в прилегающих морях;
- урегулирование на выгодных для страны условиях имеющихся политических и международно-правовых проблем использования Мирового океана;
- консолидацию усилий государств в мирном освоении и использовании Мирового океана.

В аспекте экономической деятельности интересы России включают:

- освоение и рациональное использование природных ресурсов Мирового океана в целях социально-экономического развития страны;
- формирование и обеспечение эффективного функционирования морских (речных) транспортных коммуникаций;
- обеспечение выгодных для Российской Федерации условий участия в международном разделении труда на рынке товаров и услуг;
- поддержание необходимого научно-технического, промышленного и кадрового потенциала, обеспечивающего военно-морскую деятельность.

### **Цели и задачи морской деятельности России**

Как известно, основными субъектами морской деятельности в России являются:

- морехозяйственный комплекс, включающий промышленное рыболовство, торговое судоходство, добычу с морского дна полезных ископаемых и другие виды хозяйственного использования океана;
- научно-технический комплекс по исследованию океанов и морей, обладающий мощным научным потенциалом и высококвалифицированными кадрами;
- Военно-Морской Флот, Федеральная пограничная служба Российской Федерации, Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, которые обеспечивают защиту национальных интересов в Мировом океане;
- население, проживающее на побережье арктических и тихоокеанских морей, включая коренные малочисленные народы, для которых прилегающее море является основным источником жизнеобеспечения.

Активность России в Мировом океане может существенно повлиять на ее конкурентоспособность в военной, финансовой, коммерческой, научной и социальной сферах, поскольку хозяйствование на территории страны в связи с ее географическим положением и объективными природно-климатическими характеристиками при прочих равных условиях требует больших удельных затрат и капиталовложений [2].

Для решения этих стратегических проблем необходима интеграция усилий различных стран, направленная на создание условий, обеспечивающих равноправную реализацию национальных и геополитических интересов России в Мировом океане.

Основной целью морской деятельности России является комплексное изучение, освоение и эффективное использование ресурсов и пространств Мирового океана в интересах экономического развития, обеспечения безопасности страны и охраны ее морских границ.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- активизировать деятельность России в Мировом океане в соответствии с целями и задачами развития страны;
- ориентировать деятельность России в Мировом океане на получение конечных практических результатов в ближайшей перспективе;

- обеспечить формирование и осуществление единой скоординированной государственной политики, нацеленной на консолидацию внутригосударственных и международных интересов России в деле использования Мирового океана и интеграцию заинтересованных сторон в области развития морской деятельности страны.

При этом морская деятельность России должна быть тесно увязана и согласована с решением всего комплекса внутренних и международных проблем изучения, освоения и эффективного использования ресурсов и пространств Мирового океана в интересах обеспечения устойчивого развития.

В современных финансовых условиях морская деятельность России может стать основным экономическим и политическим фактором перехода к устойчивому экономическому развитию страны. XXI век будет веком Мирового океана и Россия должна быть к этому готова.

#### **Международные аспекты сотрудничества в области навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения морской деятельности**

В международном аспекте к одному из наиболее важных и актуальных направлений взаимодействия различных стран применительно к проблемам освоения Мирового океана, безусловно, относится сотрудничество в области навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения (НГ и ГМО) морской деятельности. Своевременное развертывание системы оперативного гидрометеорологического обеспечения на базе средств дистанционного зондирования и средств метеорологической радиолокации чрезвычайно важно для удаленных акваторий и труднодоступных прибрежных зон независимо от национальных границ.

Необходимость создания адекватной системы НГ и ГМО определяется также и важностью освоения морских нефтегазовых месторождений на шельфе, особенно при учете масштабов и сложности изыскательских и строительных работ, особенностей физико-географических и гидрометеорологических условий районов их проведения.

В интересах международной интеграции и повышения качества и количества функций НГ и ГМО мореплавания можно выделить следующие направления международного сотрудничества:

- разработка концепции и долгосрочной программы международного сотрудничества в области НГ и ГМО морской деятельности;
- создание замкнутой системы навигационного поля на акватории Мирового океана и реализация концепции единого навигационного поля;
- разработка и поддержание системы обеспечения различных потребителей картографическими материалами и навигационными пособиями (включая цифровые карты и электронные системы) в соответствии с международными стандартами;
- определение и согласование с заинтересованными отечественными и зарубежными организациями содержания и методов океанографического обеспечения морской деятельности; разработка мероприятий по реализации данного вида обеспечения;

- определение задач, объема и методов проведения гидрографических и океанографических исследований Мирового океана и их согласование с аналогичной деятельностью других стран; оптимизация состава гидрографических и океанографических судов;
- организация разработки новых технических средств морской навигации, гидрографии и гидрометеорологии на основе принципов международной интеграции;
- оптимизация системы НГ и ГМО России с учетом ее роли в обеспечении отечественных и зарубежных пользователей;
- разработка и совершенствование методов финансового обеспечения Гидрографической службы России, исходя из принципа оптимального использования финансовых средств и средств, получаемых от отечественных и зарубежных организаций.

Учитывая взаимную заинтересованность всех стран в полномасштабном развитии международной системы поиска и спасения на море, чрезвычайно важно сотрудничество в области НГ и ГМО спасательных операций.

Полномасштабное навигационно-гидрографическое и гидрометеорологическое обеспечение операций по поиску и спасению на море позволяет:

- сократить сроки поиска терпящих бедствие кораблей, судов, их экипажей;
- повысить готовность спасателей к проведению поисково-спасательных операций;
- повысить эффективность действий по непосредственному спасению экипажей кораблей и судов;
- оптимизировать мероприятия по устранению последствий аварии.

В качестве первоочередных направлений сотрудничества России в области НГ и ГМО поиска и спасения на море можно предложить следующие мероприятия:

- разработку международной правовой основы для сотрудничества в области навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения поиска и спасения на море, создание координационной группы или поручение координационных функций в данной области одной из существующих структур;
- определение зон ответственности стран, готовых сотрудничать в области поиска и спасения, для заблаговременного изучения природной среды в потенциально опасных районах плавания кораблей и судов;
- выработку единых стандартов и требований к информации о природных условиях, предназначенной для обеспечения операций спасения, единых форматов и процедур обмена этими сведениями на различных этапах поисково-спасательных операций на море;
- проведение совместных предварительных исследований потенциально опасных районов Мирового океана вне зон ответственности;
- совместную разработку и обмен техническими достижениями в области средств оперативного дообследования среды в интересах проведения поисковых и спасательных работ;
- совместную разработку унифицированных систем мониторинга среды в районе бедствия.

### **Аспекты сотрудничества в области перспективных исследований и разработок в рамках проблемы устойчивого развития**

С учетом принятых международных обязательств и перспектив устойчивого развития морская деятельность России и других стран должна обеспечить и укрепить экономический и сырьевой потенциал государств, улучшить снабжение населения продуктами питания, его информированность и защиту от стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций техногенного характера, связанных с процессами, происходящими в Мировом океане.

В связи с этим целесообразно выполнение следующих исследований и разработок при подготовке и реализации программ устойчивого развития:

1. Разработка элементов политической стратегии, обеспечивающей устойчивое развитие и использование морских ресурсов, в части разработки концепции обеспечения экологической безопасности совместной деятельности субъектов экономики различных стран в навигационно-гидрографическом и гидрометеорологическом отношении.

2. Проведение исследований национальных систем управления и охраны морской природной среды, разработка рекомендаций по их совершенствованию с учетом международных подходов к проблеме охраны окружающей среды и устойчивого развития.

3. Идентификация «горячих точек» (объектов), воздействующих на окружающую среду на акваториях и приморских территориях, включая выявление на основе натурных исследований экологически опасных объектов и источников загрязнения; формирование специализированных баз метаданных в составе интегрированного банка данных о морской природной среде.

4. Анализ управления существующими особо охраняемыми природными территориями в береговых и морских зонах, разработка предложений по созданию новых. Проведение комплексной навигационно-гидрографической и гидрометеорологической экспертизы предложений, подготовка рекомендаций по согласованию документации по улучшению управления объектами природного наследия в зонах ответственности стран.

5. Разработка предложений по унификации натурных исследований и изысканий для обеспечения проектирования и строительства гидротехнических сооружений и проведения экологического мониторинга; разработка методических и нормативно-правовых документов по организации международной системы экологического мониторинга.

6. Проведение экспедиционных исследований и создание баз и банков данных по результатам обследования и мониторинга морских и речных экосистем.

7. Создание интегрированной географической информационной системы «Природопользование и экологическая безопасность Мирового океана и прибрежных зон» для использования в качестве инструмента управления природной средой. Налаживание ее координированного применения при проектировании и строительстве гидротехнических, нефтегазодобывающих, трубопроводных и других объектов и сооружений в прибрежной зоне с использованием региональных и международных информационных систем.

В соответствии с изложенным в рамках этих исследований в **навигационно-гидрографическом и гидрометеорологическом** отношении целесообразно осуществить:

- изучение гидрографических и геодезических характеристик прибрежных территорий и прилегающих участков акваторий; анализ их обеспеченности картографическими материалами, общую оценку уровня НГ и ГМО речного и морского транспорта, включая портовые и другие гидротехнические сооружения;
- исследование состояния экологической безопасности на речных и морских акваториях;
- оценку требований по обеспечению экологически безопасного совместного функционирования и деятельности субъектов экономики Российской Федерации и зарубежных государств на различных акваториях в навигационно-гидрографическом и гидрометеорологическом отношении;
- оценку речных и морских биологических ресурсов, оценку минерально-сырьевых ресурсов прибрежных шельфовых зон;
- оценку экономико-географического потенциала для определения возможности размещения новых производств на приморских территориях и акваториях и выработку требований по созданию системы их НГ и ГМО;
- оценку инфраструктурного потенциала в части составляющей НГ и ГМО речного и морского транспорта и возможности использования национальных инфраструктур НГ и ГМО;
- оценку коммерческой эффективности за счет улучшения инвестиционного климата в области морского (речного) транспорта и других видов экономической деятельности на море при переводе на уровень мировых стандартов средств НГ и ГМО, а также возможного возрастания отчислений в бюджет при создании новых рабочих мест на высокотехнологичных предприятиях;
- обоснование необходимости развития национальных систем НГ и ГМО транспорта, других видов морской деятельности как средства укрепления межнациональных связей;
- оценку влияния уровня НГ и ГМО на эффективность систем жизнеобеспечения и спасения на акваториях, снижение потерь и предотвращение экологических аварий и катастроф на акваториях и в прибрежных зонах.

#### **Аспекты сотрудничества в области управления прибрежными зонами**

Особую роль в процессах освоения ресурсов Мирового океана и практической реализации устойчивого развития играют прибрежные зоны.

Для России экономический аспект решения проблемы устойчивого развития в значительной мере связан с освоением минерально-сырьевых ресурсов и потенциальной возможностью создания крупных транспортных коридоров. При этом разносторонние, постоянные и адаптируемые национальные программы действий должны сочетаться с управлением береговыми зонами.

Основными чертами прибрежных зон, которые определяют специфику управления, являются их привлекательность для многообразной деятельности, ограниченность ресурсов, чрезвычайная хрупкость и чувствительность

среды этих зон к антропогенным нагрузкам, ускоренная деградация окружающей среды, необходимость создания системы планового управления их развитием для поддержания продуктивности естественных функций и сохранения их ресурсов.

Так, например, для доставки продукции в Россию и Западную Европу планируется создание системы подводных трубопроводов и мощного танкерного флота. Аналогичные проекты осуществляются на Черном море, в Дальневосточном регионе и в восточной части Финского залива, что и определяет актуальность проблемы повышения эффективности комплексного управления прибрежными зонами [3].

Мониторинг прибрежных зон дает информацию о состоянии территорий и позволяет объективно оценивать влияние на него принятых управленческих решений. В связи с этим важным является формирование целевых функций мониторинга и определение его основных параметров [3].

В рамках совместной международной деятельности с учетом изложенного в документах [3], на наш взгляд, целесообразно сосредоточиться на таких направлениях, как:

- разработка проектов руководств для обеспечения стратегического планирования в управлении прибрежными зонами на национальном и международном уровнях;
- определение значимых индикаторов для мониторинга и оценки биологического разнообразия, особенно в неустойчивых экосистемах;
- разработка методологических подходов и инструментов для оптимизации взаимодействия прибрежного природопользования и локальных экосистем, особенно в районах, подверженных интенсивному антропогенному воздействию;
- разработка оптимальной интеграции институциональных и правовых систем с программами комплексного управления прибрежными зонами;
- разработка практических моделей для оптимизации управления морскими и прибрежными охраняемыми территориями;
- изучение проблем, связанных с необходимостью интеграции управления открытыми и прибрежными частями морей и океанов;
- разработка управленческих программ по защите малых островов, особенно в арктических морях (см. также [4]).

В качестве конкретных мероприятий можно предложить следующие.

1. Разработка международных нормативных документов, предусматривающих проведение в обязательном порядке мероприятий по обеспечению системного мониторинга прибрежной зоны и, в первую очередь, морской среды при разработке и реализации программ устойчивого развития.

2. Создание международной рабочей группы по разработке типовой структуры, унификации перечней данных и методик мониторинга прибрежной зоны.

3. Создание аттестованных эталонных территорий (включая акватории), имеющих статус территорий с ограниченной хозяйственной деятельностью и оснащенных системами мониторинга, который бы обеспечивал управленческие круги эталонными исходными данными о состоянии прибрежной зоны.



4. Подготовка и переподготовка специалистов в области систем и технологий мониторинга морской среды и прибрежной зоны с учетом большой протяженности прибрежных зон и необходимости использования дистанционных и контактных методов мониторинга.

5. Учреждение специального периодического издания, посвященного проблемам мониторинга морской среды и прибрежной зоны, или, на первом этапе, соответствующих разделов в профильных журналах, с учетом актуальности обмена информацией по научным и практическим проблемам в этой области.

7. Разработка правовых и организационных рамок для обмена данными мониторинга прибрежных зон в интересах устойчивого развития для акваторий, разделяемых границащими друг с другом странами.

### **Заключение**

Основные положения международной стратегии по охране окружающей среды Мирового океана и прибрежных зон с целью обеспечения устойчивого развития являются основой конструктивного взаимодействия международного сообщества для комплексного решения проблем сбалансированного развития экономики и улучшения состояния окружающей среды.

Осуществление стратегии предусматривает реализацию прав будущих поколений на пользование природно-ресурсным потенциалом Мирового океана.

В процессах освоения пространств Мирового океана постоянно возрастает роль координации деятельности разных стран по организации интегрированной системы навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения морской деятельности, что, в свою очередь, требует расширения международного научного и технического сотрудничества.

Консолидация усилий стран - субъектов морской деятельности служит залогом реализации стратегии устойчивого развития цивилизации в третьем тысячелетии.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Основы политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2010 года (утверждены Указом Президента Российской Федерации от 4 марта 2000 г.)
2. Указ Президента Российской Федерации от 17.01.97 г. № 11 «О федеральной целевой программе "Мировой океан"» // Российская газета, - 1997. - 28 января.
3. Международная Конференция «Комплексное управление прибрежными зонами и ее интеграция с морскими науками» (Санкт-Петербург; 25-30 сентября 2000). Тез. докл. - СПб, 2000. - 148 с.
4. Национальный план действий по защите морской среды от антропогенного загрязнения в Арктическом регионе Российской Федерации (НПД - Арктика) // Межведомственная комиссия по делам Арктики и Антарктики РФ / Консультативный Комитет Защиты Морей / - М.: 2000. - 33 с.

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ  
АРКТИЧЕСКОГО СЕВЕРА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**П. Г. БРОДСКИЙ,  
В. Г. ДМИТРИЕВ,  
А. Н. ДОБРОТВОРСКИЙ,  
(ГНИНГИ МО РФ)  
М. И. ПОЛЬСКАЯ  
(НКО «Северный фонд»)**

*В статье рассмотрены некоторые проблемы создания информационной инфраструктуры Арктического севера Российской Федерации.*

*Информационная система северных регионов предназначена для осуществления полноценного информационного обмена всех потенциальных пользователей как в интересах управления территориями, так и с целью интерактивного вовлечения населения в международное информационное пространство. Наиболее перспективным для северных регионов представляется использование всемирной сети Интернет. Будущая информационная система видится как распределенная система согласованных баз данных с единым лингвистическим обеспечением на основе продуманной классификации информационных ресурсов с централизованным управлением. Пользовательская ее часть создается в виде Web-портала, обеспеченного многофункциональной системой поиска и широким спектром коммуникационного сервиса.*

Арктическая зона Российской Федерации по праву считается стратегическим территориальным ресурсом размещения и развития производительных сил. Как известно, эти территории составляют преобладающую часть регионов, подлежащих освоению в настоящем, и, что особенно важно, в будущем.

Нынешний этап развития России характеризуется ее стремлением к равноправному участию в мировых процессах. В связи с этим особую актуальность приобретает следование принципу устойчивого развития, выработанному усилиями мирового сообщества и закрепленному в документах ООН [1]. Для России экономический аспект решения проблемы устойчивого развития в значительной мере связан с освоением минерально-сырьевых ресурсов арктического шельфа и потенциальной возможностью создания здесь крупных транспортных коридоров. Так, по мнению профессора Е. Ножина [2] «роль Северного морского пути (СМП) неизбежно возрастет уже в ближайшие годы, в первую очередь, в связи с интенсивным освоением Ямальских месторождений энергетического сырья, а также гигантских запасов углеводородов на шельфах Баренцева и Карского морей. Значительно возрастут и транзитные перевозки: Северный морской путь станет эффективным средством межконтинентальных и международных транспортных связей между Европой, Азией и Америкой. По расчетам специалистов, объем транзитных перевозок по СМП к 2005 г. может достигнуть 5-7 млн. тонн в год».

Согласно высказываниям руководителей Департамента по делам Севера Минэкономразвития России [3], по мере стабилизации экономики России и дальнейшего подъема значения Севера как крупного поставщика продукции природно-ресурсных отраслей, а также значительного улучшения функциони-

рования СМП как транзитной зоны между Россией и Мировым рынком в Европе и Азиатско-Тихоокеанском регионе геополитическое значение Севера России будет весьма существенно расти.

О необходимости освоения экономического потенциала северных регионов и их устойчивого развития как в интересах России, так и в целях международного сотрудничества, убедительно свидетельствуют материалы Форума северных территорий (9-12 ноября 1999 г., Санкт-Петербург, Россия). Однако развитие любых территорий практически невозможно при отсутствии надежной и эффективной системы их информационного взаимодействия. Поэтому создание такой системы и представляется системообразующей доминантой стратегии развития Российского Севера.

Комплексное развитие информационной инфраструктуры территорий вдоль СМП призвано обеспечить повышение эффективности решений в области социально-экономических проблем Севера.

Основные **проблемы создания информационной инфраструктуры** видятся в следующем. Существенные трудности для построения информационной системы вдоль трассы СМП приносят географические особенности региона. Только одна Республика Саха (Якутия) - одно из самых крупных по размерам национально-государственных образований в Российской Федерации - занимает почти всю северо-восточную часть Азиатского материка (более 3 миллионов квадратных километров), протянувшись с запада на восток - на 2500 км. Помимо континентальной части, в состав Республики входит ряд островов Северного Ледовитого Океана, в том числе Новосибирские острова. Свыше 40% территории Якутии находится за Полярным кругом. Столица Республики Якутск удалена от Санкт-Петербурга на 6724, от Магадана на 1062, а от Владивостока на 1814 км. Кроме того, определенные особенности оперативного информационного обмена обуславливаются распределением часовых поясов.

Информационная система северных регионов предназначена для осуществления полноценного информационного обмена всех потенциальных пользователей как в интересах управления территориями, так и с целью интерактивного вовлечения населения северных территорий в международное информационное пространство. В число задач, стоящих перед информационной системой северных регионов, входит обеспечение национальных интересов по эффективному использованию природных ресурсов Севера как национального достояния, обеспечение информационного процесса функционирования арктической транспортной магистрали, координация усилий по реализации трансконтинентальных перевозок на международном уровне и др.

Современная информационная инфраструктура может осуществляться только с применением новейших информационных сетевых технологий. Наиболее перспективным для северных регионов, на наш взгляд, представляется использование всемирной сети Интернет. Будущая информационная система северных регионов видится как распределенная система согласованных баз данных с единым лингвистическим обеспечением на основе продуманной классификации информационных ресурсов с централизованным управлением специально сформированной информационной службой. Пользовательская

часть информационной системы создается в виде разветвленного Web-сайта, обеспеченного многофункциональной системой поиска и широким спектром коммуникационного сервиса.

Информационная система на базе технологий Интернет позволит всемерно использовать все сервисы всемирной компьютерной сети, к основным из которых можно отнести сервисы «отложенного чтения» (электронную почту, ежедневные ссылки, обзоры новостей и т.п.), сервисы прямого обращения (поиск в сети и др.) и интерактивные сервисы (вплоть до организации мультимедиа телеконференций).

Примечательно, что технологии Интернет позволяют эффективно осуществлять дистанционное обучение для удаленных пользователей. В настоящее время накоплен достаточно богатый опыт обучения в Интернете по весьма широкому спектру дисциплин.

Процесс создания глобальной информационной системы северных регионов должен, по-видимому, осуществляться поэтапно.

На первом этапе создания информационной инфраструктуры, на наш взгляд, требуется проанализировать информационные ресурсы будущей системы, провести их классификацию, отработать структуру информационного пространства, подготовить лингвистическое обеспечение и решить другие задачи методологического плана.

На последующих этапах необходимо продумать состав и структуры баз данных, архитектуру системы серверов, разработать Web-сайт и начать формирование информационных ресурсов. Отдельная большая проблема – закупка и размещение техники. Особое внимание следует уделить подготовке кадров будущих пользователей информационной системы.

Проектирование автоматизированных информационных систем поддержки территориальных процессов управления включает этап тщательного анализа предметной области административных интересов. Как правило, этот этап представляет собой весьма трудоемкий процесс, особенно в случае детального изучения состава информационных ресурсов, необходимых для территориального управления.

В основу предлагаемой ниже **обобщенной классификации информационных ресурсов** положен функциональный принцип. При этом во избежание чрезмерной детализации и для обеспечения устойчивости иерархической структуры рубрик выполнялось комплексирование однородных потребительских функций с целью формирования достаточно общих, но сохраняющих содержательность и относительную независимость, блоков.

Предложенный вариант классификации информационных ресурсов территориального управления может быть использован в качестве ориентировочной версии дерева рубрик, позволяющей в семантическом плане разграничить тематические разделы предметной области.

Спектр информационных ресурсов территориального управления в обобщенном виде может быть представлен следующими крупными блоками: **основы государственного управления, социальный блок, экономический блок, природно-ресурсный блок, блок внешних связей.**

Блок «Основы государственного управления» объединяет информацию по нормативно-правовой базе системы управления территориями, админист-

ративному делению, общим прогнозам, планам и программам социально-экономического развития, разграничению полномочий между структурами управления различного уровня, политическим основам государственного управления (данные о партиях, движениях, конфессиях, избирательных системах и т.п.), органам власти и государственного управления, системам управления, финансам, гражданской обороне, чрезвычайным ситуациям и т.д. В этом блоке следует особо выделить подсистему поддержки нормативно-правового обеспечения процессов социально-экономического преобразования в северных регионах страны, которые в настоящее время регламентируются более чем семьюдесятью законами, указами Президента РФ, постановлениями и распоряжениями правительства Российской Федерации.

«Социальный блок» включает данные по основным проблемам, связанным с потребностями населения: демография и проблемы населения, системы обслуживания населения (охрана общественного порядка, торговля, общественное питание, бытовое обслуживание, гостиницы, туризм, медицина и здравоохранение, социальное обеспечение, система образования, культура, физическая культура и спорт, религия).

«Экономический блок» описывает руководство и управление хозяйством, а именно, общие экономические проблемы, проблемы муниципальной, федеральной и других видов собственности, виды экономической деятельности: промышленность (по видам промышленности), сельское хозяйство, транспорт, связь, топливно-энергетический комплекс, архитектуру и градостроительство, жилищно-коммунальное хозяйство, кадры руководителей в сфере хозяйствования, фонды зданий и сооружений, топливное снабжение, проблемы эксплуатации объектов коммунального хозяйства и объектов дорожного хозяйства, озеленение населенных мест, благоустройство и санитарное содержание населенных пунктов, лесное хозяйство, охотничье хозяйство, водное хозяйство, рыбное хозяйство, военное дело, систему противопожарной безопасности.

«Природно-ресурсный блок» предназначен для представления географического описания территорий, сведений о природных условиях и природных ресурсах, об управлении природопользованием (землепользованием, лесопользованием, использованием водных объектов, недр, ресурсов растительного и животного мира). Он же включает информацию о потреблении природных ресурсов, о характеристиках воздействия на природную среду, данные о нарушениях правил пользования и возмещении ущерба, необходимые для анализа проблем природопользования, а также информацию о состоянии охраны окружающей среды (в том числе и по особо охраняемым территориям) для оценки и прогноза ее экологического состояния.

Наконец, «Блок внешних связей» содержит характеристики регионального взаимодействия администраций различного уровня с другими органами власти и управления, данных о связи администраций с населением, о договорах, соглашениях и т.п., а также широкий круг вопросов в области международного сотрудничества.

Перечисленные выше тематические разделы в целом охватывают основную часть ресурсов будущей системы информационного обеспечения се-

верных регионов. По мере создания системы тематические разделы будут уточняться и детализироваться.

Концепция долгосрочного социально-экономического развития подчеркивает важнейшее народнохозяйственное значение этого региона для экономики страны, в связи с чем комплексная информатизация северных регионов гарантирует обеспечение интересов России в Арктике и раскрывает долгосрочную перспективу развития территорий.

Для решения поставленных выше задач целесообразно привлечь инвестиции всех заинтересованных партнеров и максимально использовать интеллектуальный и технический потенциал Санкт-Петербурга, поскольку большая часть затрагиваемых вопросов имеет непосредственное отношение к этому центру консолидации северных регионов не только России, но и приарктических государств. Санкт-Петербург традиционно вносил и вносит огромный вклад в развитие экономики, транспорта, коммуникаций, науки и образования Севера. В научно-исследовательских институтах и вузах города накоплен опыт работ в области создания автоматизированных систем обработки информации и управления, многоканальных телекоммуникационных систем, спутниковых и компьютерных систем связи, программного обеспечения информационных систем и т.п. Особенно важно подчеркнуть, что в Санкт-Петербурге развивается направление создания территориально распределенных информационных систем в области природных ресурсов и управления территориями.

Таким образом, для обеспечения устойчивого развития северных территорий и обеспечения адекватных жизненных условий для всех жителей Севера, в особенности его коренных народов, необходимо создание современной информационной инфраструктуры, что требует крупных инвестиций. Этому процессу может способствовать активное сотрудничество в арктическом регионе России, Европы, Канады, США и Японии по развитию Арктической транспортной системы транзитных перевозок грузов между портами Европы и странами Азиатско-Тихоокеанского региона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рио-де-Жанейрская декларация по окружающей среде и развитию. Утверждена Конференцией ООН по окружающей человека среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 3–14 июня 1992 г.) // Документ ООН A/CONF.151/26/Rev.1 (Vol. I). - P. 3–7.
2. [http://www.nasledie.ru/oboz/N1-2\\_97/016.htm](http://www.nasledie.ru/oboz/N1-2_97/016.htm)
3. <http://www.mediatext.ru/docs/2063?page=10>

**ГЕОДЕЗИЯ НА РУБЕЖЕ ВЕКОВ И ТЫСЯЧЕЛЕТИЙ****В. А. КОУГИЯ**  
(ПГУПС)

*В статье изложен исторический очерк развития геодезии. Основное внимание уделено прогрессу в исследованиях формы и размеров Земли.*

Круглые даты не представляют собой каких-нибудь объективных рубежей на шкале времени и отличаются от других, менее заметных дат, только благодаря принятой системе счисления. Тем не менее, они побуждают оглянуться назад и оценить произошедшие изменения, не столь заметные на малых отрезках времени.

Для геодезии, как и для многих других отраслей науки и практики, прошедшее XX столетие явилось этапом колоссального, невиданного прогресса. Не претендуя на сколько-нибудь полный анализ, хочу привлечь внимание читателя к некоторым поражающим воображение успехам геодезии, к небывалому ускорению темпов их развития, особенно в последние десятилетия.

Вспомним некоторые факты из истории изучения формы и размеров Земли. Первое исторически известное определение размеров Земли как шара выполнил александрийский ученый Эратосфен (278-196 гг. до н. э.). Зная высоты Солнца в день летнего солнцестояния в полдень в Асуане (Сиена) и Александрии и полагая, что эти пункты расположены на одном меридиане, он определил угловое расстояние между этими городами как разность названных высот. Длину дуги меридиана измерил по времени движения караванов между городами, а по длине дуги и углу вычислил радиус Земли. Аналогичные измерения выполнены греческими учеными Посидонием (135-50 гг. до н. э.) и Птолемеем (87-165 гг.). Полагают, что результаты определения радиуса Земли Эратосфеном и Птолемеем, выраженные в современных мерах, составляют соответственно 6311 км и 6059 км [1].

Последним определением размеров Земли как шара явилось градусное измерение в 1669-1670 гг. по дуге меридиана от Парижа до Амьена, выполненное методом триангуляции французским ученым Ж. Пикаром. Для средней широты  $49^{\circ}30'$  им получена длина дуги градуса меридиана, равная 111212 м, чему соответствует радиус шара, равный 6371692 м. Таким образом, исторически известные исследования размеров Земли как шара заняли без малого 19 столетий.

Завершающий этап названных исследований одновременно явился и началом господства в геодезии метода триангуляции, значительно повысившего точность геодезических построений. Для определения больших расстояний стали строить цепочки треугольников, в которых измеряли все углы и длины отдельных сторон-базисов, удобных для измерения линейными приборами. Длины базисов измеряли металлическими жезлами, а углы – теодолитом, снабжаемым со времен Пикара зрительной трубой с сеткой нитей и верньером для взятия отсчетов по горизонтальному кругу.

Новый метод измерений – триангуляция - появился весьма кстати. В связи с открытием И. Ньютоном (1642-1727 гг) закона всемирного тяготения и обоснованием им взгляда на форму Земли как сфероид с предполагаемой величиной полярного сжатия 1:230 понадобилась проверка теории. С этой целью стали проводить измерения методом триангуляции дуги градуса меридиана под разными географическими широтами. Назовем некоторые, наиболее ранние из них. Ж. Кассини, Дж. Маральди и Ф. Лаир к 1718 г. выполнили так называемое Большое градусное измерение двух дуг длиной 2°12' и 6°19' во Франции. П. Мопертюи, Ш. Камюз, А. Клеро и А. Цельсий в 1736-1737 гг. в ходе Лапландской экспедиции измерили дугу 57,5'. П. Буге, Ш. Лакондамин и Л. Годен в 1735-1742 гг. произвели градусное измерение дуги длиной 3°2' в Перу. Ж. Делабр и П. Мешен в 1792-1798 гг. выполнили второе Большое французское градусное измерение в 9°40' от Дюнкерка до Барселоны и градусное измерение в Перу. Проведенные измерения в общем подтвердили наличие полярного сжатия Земли (за исключением результатов Ж. Кассини, которые из-за неточностей измерений противоречили теории Ньютона) [2].

К числу таких работ в России относится завершено в 1852 г. градусное измерение по дуге меридиана от устья Дуная до берега Северного Ледовитого океана длиной более 25°, выполненное военным геодезистом К. И. Теннером и астрономом В. Я. Струве и получившее название дуги меридиана Струве. Были проведены и другие градусные измерения, в числе которых - измерения по направлению параллелей от Кишинева до Астрахани и от Варшавы до Орска.

С конца XVIII в. метод триангуляции во многих странах стали применять не только для градусных измерений, но и для создания астрономо-геодезических сетей как основы для топографических съемок точных карт. Одновременно учитывалась возможность использования этих сетей и для дальнейшего уточнения размеров Земли. На основе различных наборов результатов градусных измерений были получены разные параметры земного эллипсоида; некоторые из них приведены в табл. 1.

Таблица 1

Определения размеров земного эллипсоида в XIX веке

Фамилия	Год	Большая полуось, м	Полярное сжатие
Делабр	1800	6 375 653	1:334,00
Вальбек	1819	6 376 896	1:302,78
Эверест	1830	6 377 276	1:300,81
Эри	1830	6 376 542	1:299,33
Бессель	1841	6 377 397	1:299,15
Теннер	1844	6 377 096	1:302,5
Шуберт	1861	6 378 547	1:283,0
Кларк	1866	6 378 206	1:294,98
Кларк	1880	6 378 249	1:293,47
Жданов	1893	6 377 717	1:299,7
Гельмерт	1906	6 378 200	1:298,3
Хейфорд	1909	6 378 388	1:297,0



Больше трех веков, до конца XX столетия триангуляция продолжает оставаться основным методом построения геодезических сетей, и применяемые при этом измерительные приборы хотя и совершенствуются, но принципиально изменяются мало. Углы треугольников и углы для определения широт, долгот и азимутов измеряют теодолитами, расстояния – мерными приборами.

Так, в руководстве [3] о приборах для измерения расстояний читаем: «Приборы, служащие для точного измерения длины базиса и называемые базисными приборами, можно разбить на две группы: жезловые, в которых для измерения служит твердый жезл ... длиной от 2 до 4 м и приборы с проволоками, в которых измерение ведется проволокой или лентой со шкалами на концах и длиной в 24 м и более, подвешиваемой с постоянным натяжением.» И там же: «Дольше всех удержались жезловые приборы в Германии, но и там с 1932 г. перешли к прибору Едерина (базисному прибору с проволоками. *Примечание наше. В. К.*)».

В инструкции о построении государственной геодезической сети СССР [4], изданной в 1966 г., указывается, что «измерение базиса триангуляции 1 и 2 классов производится базисным прибором БП-1». И там же: «Средние квадратические ошибки длин базисных сторон звеньев триангуляции 1 класса не должны превышать 1:400000... Вместо базисных сторон могут определяться выходные стороны из базисных сетей, в которых базисы измеряются первоклассным базисным прибором Едерина с ошибкой не более 1:1000000».

Однако понемногу нарастает характерное для XX века ускорение. В 30-е годы появляются теодолиты со стеклянными кругами - оптические теодолиты Вильда. В 50-е годы – первые светодальномеры и радиодальномеры. Сети триангуляции в разных странах покрывают все большие территории.

Крупным вкладом в мировую геодезическую науку и развитие геодезических работ в нашей стране явились исследования Ф. Н. Красовского, М. С. Молоденского и А. А. Изотова по установлению размеров земного эллипсоида. К началу века в России в разных районах использовали различные эллипсоиды: Вальбека, Бесселя, Кларка. После 1924 г. развернулись работы по развитию в СССР от западных границ на восток государственной триангуляции как единой астрономо-геодезической сети. Для обработки сети была принята Пулковская система координат 1932 г., использовавшая эллипсоид Бесселя. За исходные геодезические координаты были приняты астрономические координаты Пулковской обсерватории, высота геоида в Пулково принята равной нулю. В сети, одновременно развиваемой в восточно-сибирских и дальневосточных областях, также использовался эллипсоид Бесселя с начальным пунктом около города Свободного. Сомкнулись обе сети в 1939 г. В ходе развития сети стала ясной неприемлемость эллипсоида Бесселя – геодезические координаты пунктов сильно отличались от астрономических. Исследования по выводу параметров нового референц-эллипсоида выполнены в 1937-1940 гг. в ЦНИИГАиК под руководством Ф. Н. Красовского. Полученные результаты были закреплены Постановлением Совета Министров СССР №760 от 7 апреля 1946 г.

Для вычисления параметров эллипсоида Красовского была использована астрономо-геодезическая сеть по состоянию на 1938 г. Она содержала 449

астрономических пунктов, расположенных через 70-100 км и соединенных рядами триангуляции общей протяженностью около 40 тыс. км. При этом на Европейской территории страны ряды триангуляции образовали достаточно плотную сеть из семи дуг меридианов и пяти дуг параллелей разной длины, а восточнее Новосибирска сеть представляла собой только одну дугу, доходящую до Хабаровска. Благодаря гравиметрической съемке, выполненной на территории, расположенной к западу от Новосибирска, на 298 пунктах были вычислены гравиметрические уклонения отвесных линий, а на остальных - топографо-изостатические редукции. Поправками за движение полюсов исправлены астрономические координаты не всех пунктов. В результате обработки градусных измерений СССР были получены следующие размеры земного эллипсоида: двухосного -  $a = 6378272$ ,  $\alpha = 1: 298,2$ ; и трехосного -  $a = 6378299$ ,  $\alpha = 1: 299,9$ . Выполнена также совместная обработка градусных измерений СССР, Западной Европы и США, по которым получены следующие результаты: для двухосного эллипсоида -  $a = 6378295$ ,  $\alpha = 1: 298,4$ ; для трехосного эллипсоида -  $a = 6378245$ ,  $\alpha = 1: 298,3$ . Параметры  $a = 6378245$  и  $\alpha = 1: 298,3$  были приняты в качестве референц-эллипсоида СССР и используются до настоящего времени как параметры координатной системы СК-42. Эллипсоид Красовского явился вершиной трехвекового пути исследования размеров Земли методом триангуляции.

Однако триангуляция возможна лишь на континентальной суше, а вся суша занимает только 29% поверхности Земли. Пришло время других методов.

Информацию о форме Земли дают измерения силы тяжести и уклонений отвесных линий. К началу 50-х гг. гравиметрической съемкой было покрыто только 10,7 % земной поверхности - 19 % северного полушария и только 2,4 % южного полушария [5]. Общее число гравиметрических пунктов было 26 тыс., причем 65 % - на территории СССР. В последующий период значительные работы по Мировой гравиметрической съемке, в том числе в океане выполнены США, Россией, Канадой и другими странами. За период 1950-1975 гг. площадь трапеций  $1^\circ \times 1^\circ$  Мировой гравиметрической съемки возросла в 4,6 раза, а число гравиметрических пунктов - в 350 раз с существенным повышением их точности (по меньшей мере, на порядок). В 1979 г. при расчете параметров Земли, положенных в основу координатной системы WGS-84, использовано 4584 средних значений аномалий силы тяжести для трапеций  $3^\circ \times 3^\circ$  (64% от общего числа таких трапеций) [6].

Научные и технические достижения второй половины XX века открывают новые возможности для решения геодезических задач. Искусственные спутники Земли, электронная вычислительная техника, радиоэлектронные средства измерений в сочетании с мощными производительными силами, высокими технологиями и развитой инфраструктурой создали совершенно новую ситуацию. То, на что прежде требовались века, происходит за годы.

В 60-е гг. развернулись работы по созданию геодезических сетей глобального масштаба с применением геометрических методов спутниковой геодезии. Так, методом оптической спутниковой триангуляции, использующей выполненные в разных пунктах синхронные фотоснимки спутников на фоне

звездного неба, построены Всемирная сеть Смитсоновской астрономической обсерватории (SAO) из 39 пунктов, Всемирная сеть проекта PAGEOS из 45 пунктов, Европейская сеть от Норвегии до Сицилии. Методом спутниковой трилатерации с помощью радиодальномерной системы SECOR построена геодезическая сеть по островам Тихого океана от Японии до Гавайских островов [7]. В 70-80-е гг. методом оптической спутниковой триангуляции построена глобальная российская геодезическая сеть в единой системе координат [8].

К 80-м годам развернулись работы по спутниковой альтиметрии, которые дали новые обширные данные о «топографии» поверхности мирового океана - об отклонениях средней поверхности моря от поверхности принятых моделей геоида и эллипсоида.

Новые возможности возникли с появлением спутниковых систем TRANSIT и ЦИКАДА и применением орбитального метода. Из обработки доплеровских измерений, связывающих положения спутников на орбитах с пунктами глобальной геодезической сети, определяют орбиты спутников. Знание орбит спутников позволяет определить положение центра масс Земли в системе координат геодезической сети, что равносильно определению геоцентрических координат пунктов наблюдений. При совместном уравнивании всех измерений одновременно уточняются и орбиты, и координаты пунктов. Решение координатной задачи по привязке центра масс Земли к сети геодезических пунктов дополняется построением модели гравитационного поля всей Земли по данным гравиметрии и спутниковой альтиметрии. Получается качественно новая, значительно более полная модель планеты Земля.

Таблица 2

Размеры эллипсоидов по решению Генеральных ассамблей МАГ

Название эллипсоида	Год	Большая полуось (м)	Точность	Сжатие
Референц-система-67	1967	6378160	±30	1:298,247
G1	1975	6378140	±5	1:298,257
G2	1980	6378137	±2	1:298,257
G2	1983	6378136	±1	1:298,257

На основе разносторонних данных установлены размеры геоцентрического земного эллипсоида, уточнение их происходит в небывалом прежде темпе. В табл. 2 приведены размеры некоторых эллипсоидов, зафиксированные решениями Генеральных ассамблей Международной Ассоциации Геодезии (МАГ). Особое место заняли координатные системы ПЗ-90, WGS-84 и СК-95.

Геоцентрическая координатная система WGS-84 (табл. 3) была введена в США для использования в министерстве обороны на смену WGS-72 ( $a = 6\,378\,135$ ,  $\alpha = 1:298,26$ ) и, благодаря глобальной спутниковой системе GPS, приобрела международное применение. Система включает модель гравитационного поля Земли - формулу для вычисления нормальной силы тяжести на поверхности эллипсоида и коэффициенты разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям до 180 степени. Исходными данными для гра-

витационной модели послужили 4584 средних значений аномалий силы тяжести в трапециях  $3^\circ \times 3^\circ$ , 2918 средних высот геоида в трапециях  $3^\circ \times 3^\circ$  по радиовысотным измерениям со спутника Seasat, доплеровские измерения по 7 спутникам, лазерные измерения по спутникам Lageos и Starlette, наблюдения спутников GPS, результаты наземной съемки в виде средних аномалий силы тяжести в трапециях  $1^\circ \times 1^\circ$ .

Таблица 3

Земные эллипсоиды ПЗ-90 и WGS-84

Параметры	ПЗ-90	WGS-84
Большая полуось $a$ , м	6 378 136	6 378 137
Сжатие $\alpha$	1:298,257839303	1:298,257223563
Геоцентрическая гравитационная постоянная $f \cdot M$ , $m^3/c^2$	$3\,986\,004,4 \cdot 10^8$	$3\,986\,005 \cdot 10^8$
Нормальный потенциал $U_0$ , $m^2/c^2$	62636861,074	-
Второй гармонический коэффициент $C_{20}$	$-484,164953 \cdot 10^{-6}$	$-484,16685 \cdot 10^{-6}$

В России Топографической службой ВС РФ в 1977, 1985, 1990 гг. также выводились системы параметров Земли [8, 9]. В частности, последняя из них – «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90) – включает: основные астрономические и геодезические постоянные (табл. 3); координатную основу – параметры общего земного эллипсоида и пункты Космической Геодезической сети (КГС), закрепляющие земную систему координат; планетарные модели нормальных и аномальных гравитационных полей Земли [10].

ПЗ-90 получена по результатам наблюдений на пунктах геодезической сети спутников ГЕОИК: фотографирования их на фоне звезд, радиодальномерных измерений, лазерных измерений расстояний, доплеровских измерений, измерений высот спутника над поверхностью моря (спутниковая альтиметрия). Используются также радио- и лазерные дальности, измеренные до спутников систем ГЛОНАСС и ЭТАЛОН, результаты гравиметрических съемок на суше и океане.

Координаты пунктов КГС и параметров гравитационного поля Земли определены совместным уравниванием траекторных и высотомерных измерений и гравиметрических данных. Система координат ПЗ-90 закреплена на поверхности Земли координатами пунктов КГС (26 пунктов на территории бывшего СССР и 7 пунктов в Антарктиде). Средняя квадратическая погрешность отнесения КГС к центру масс Земли составляет 1-2 м, погрешности взаимного положения пунктов при среднем расстоянии между ними 1,5-2 тыс. км – около 0,3 м.

Для создания планетарных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) использованы средние аномалии силы тяжести для трапеций  $5^\circ \times 5^\circ$  и средние высоты геоида для трапеций  $5^\circ \times 5^\circ$ . Модели ГПЗ получены в трех вариантах - в виде разложений геопотенциала в ряд сферических функций 36-ой и 200-й степени и порядка в виде систем точечных масс, а также в виде каталога средней силы тяжести по трапециям  $1^\circ \times 1^\circ$  на всю поверхность Земли. Обеспечена ошибка высоты геоида в океане менее 1 м, а аномалий силы тяжести – около 5 мГал [8, 11, 12].

В 1984-1993 гг. на основе наблюдений спутников TRANSIT построена доплеровская геодезическая сеть (ДГС) в системе координат WGS-84 с точностью положения пунктов 1 – 1,5 м [13].

Наряду с созданием земной системы координат в России идет совершенствование референцной системы координат. К 1991 г. выполнено общее уравнивание построенной на территории СССР астрономо-геодезической сети (АГС) [13]. АГС включала 164 тыс. пунктов сплошной сети триангуляции и полигонометрии 1 и 2 класса, в которой измерены около 8 тыс. базисных сторон и астрономическими наблюдениями определены 3,5 тыс. азимутов сторон. Измерения выполнены соответственно в 1 и 2 классе со средними квадратическими погрешностями (не более): углов – 0,7" и 1,0"; длин базисных сторон – 1:400000 и 1:200000. В результате уравнивания координаты (СК-42) получили поправки, возрастающие по мере удаления от Пулково и доходящие на востоке до 24 м к абсциссам и 27 м к ординатам. СКП уравненных координат – 1 м.

В 1995 г. сети АГС, ДГС и КГС уравнены совместно. Для совместного уравнивания координаты пунктов АГС дополнены их высотами над референц-эллипсоидом, вычисленными как суммы высот квазигеоида и нормальных высот. При этом использована уточненная в 1993 г. ЦНИИГАиК карта высот квазигеоида на территорию бывшего СССР. В результате уравнивания получены координаты 136 пунктов в общеземной системе координат и 7 параметров перехода от общеземной системы к референцной [13, 14, 15]. На основе результатов уравнивания сформирована новая референцная система координат СК-95, пространственные координаты которой связаны с ПЗ-90 только тремя параметрами  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ , выбранными так, чтобы геодезические широта и долгота Пулково в референцной системе остались такими же, как и в системе СК-42. Высота квазигеоида в Пулково принята равной нулю [15].

Последние десятилетия XX века внесли прогресс не только в решение фундаментальной геодезической проблемы. Всё в геодезии претерпело коренные изменения. Потеряла былое значение триангуляция. Государственная геодезическая сеть строится теперь исключительно спутниковыми методами с применением дифференциальных фазовых измерений по спутникам ГЛОНАСС и GPS. При этом взаимное положение пунктов определяют с фантастической точностью – с относительной погрешностью  $10^{-7}$ . Строительство дорогостоящих и ставших ненужными сигналов прекращено.

Происходят изменения и в технологии решения прикладных задач. С использованием спутниковых методов строят разбивочные сети при строительстве мостов, опорные геодезические сети железных дорог, маркшейдерские сети на карьерах и др. Измерения при создании съемочных сетей и съемке местности выполняют электронными тахеометрами с автоматической регистрацией результатов измерений на магнитных носителях. Обработка результатов измерений выполняется на персональных компьютерах. По результатам съемки автоматически составляются цифровые модели местности и электронные планы и карты с возможностью их редактирования, в том числе в интерактивном режиме. Для этой цели служит, например, получивший широкое распространение в России пакет программ CREDO (фирма КРЕДО-ДИАЛОГ, Минск), обеспечивающий также автоматизацию проектирования для

промышленного, гражданского и транспортного строительства. При аэрофототопографической съемке стала возможной привязка спутниковыми приемниками не только наземных опознаков, но и центров фотографирования, что существенно повысило точность съемки. При обработке фотосъемки компьютерные технологии, такие как PHOTOMOD (ЗАО «Ракурс», Москва), вытесняют прежние, использовавшие сложные и дорогостоящие оптико-механические стереофотограмметрические приборы. Возрастание точности геодезических приборов и модернизация их в направлении автоматизации отсчитывания и регистрации результатов измерений приводит к созданию электронно-теодолитных систем, включающих теодолиты, сопряженные с компьютером (например, система Kern ECDS), которые используются в машиностроении для высокоточного обмера ответственных поверхностей изделий (корпуса подводных лодок и летательных аппаратов, антенны радиотелескопов и др.).

В заключение заметим, что возможности, открывшиеся в последние десятилетия XX века благодаря новым средствам и методам геодезии, не исчерпаны, как не исчерпаны и вопросы, интересующие человечество. Повышения точности и детальности изучения планеты Земля необходимо для решения таких проблем, связанных с геодезическими измерениями, как дрейф континентов, причины землетрясений, связь морских течений с рельефом поверхности моря и многих других. При этом высокая точность спутниковых геодезических измерений и возможности их дальнейшего совершенствования позволяют надеяться на успехи в подобных исследованиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Изотов А. А. Форма и размеры Земли по современным данным // Труды ЦНИИГАиК – 1950. – Вып. 73. – 204 с.
2. Тетерин Г. Н. Памятные даты // Геодезия и картография. – 2000. - №11. – С. 62.
3. Красовский Ф. Н., Данилов В. В. Руководство по высшей геодезии. Ч. 1, вып. 1. – М.: РЕДБЮРО ГУГСК НКВД СССР. – 1938. – 419 с.
4. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. – М: Недра, 1966. – 341 с.
5. Шокин Ф. П. Гравиметрия. Методы измерения силы тяжести, аппаратура, гравиметрическая изученность Земли // Итоги науки и техники. Геодезия и аэросъемка. Том 13. – М: ВИНТИ, 1978. – С. 7 – 57.
6. Медведев П. П. Изучение топографической поверхности мирового океана // Итоги науки и техники. Геодезия и аэросъемка. Том 26. – М: ВИНТИ, 1988. - С. 76 – 129.
7. Разумов О.С. Пространственная геодезическая векторная сеть. – М: Недра, 1974. – 160 с.
8. Система геодезических параметров Земли «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90). Справочный документ. Под общей редакцией Хвостова В. В. – М: Координационный научно-информационный центр, 1998. – 37 с.
9. Параметры общего земного эллипсоида и гравитационного поля Земли (параметры Земли 1990 года). – М: РИО, 1991. – 68 с.
10. Бойков В. В., Галазин В. Ф., Кораблев Е. В. Применение геодезических спутников для решения фундаментальных и прикладных задач // Геодезия и картография. – 1993. - №11. – С. 8-12.
11. Бойков В. В., Галазин В. Ф., Каплан Б. Л. и др. Опыт создания геоцентрической системы координат ПЗ-90 // Геодезия и картография. – 1993. - №11. – С. 17-21.
12. Галазин В. Ф., Македонский Е. Л., Зуева А. Н. и др. Опыт создания планетарных моделей гравитационного поля Земли с помощью Гео-ИК // Геодезия и картография. – 1993. - №11. – С. 24-27.
13. Бовшин Н. А., Зубинский В. И., Остач О. М. Совместное уравнивание общегосударственных опорных геодезических сетей // Геодезия и картография. – 1995. - №8. – С. 6-17.
14. Ефимов Г. Н. Результаты уравнивания астрономо-геодезической сети. // Геодезия и картография. – 1995. - №8. – С. 17-22.
15. Базлов Ю. А., Герасимов А. П., Ефимов Г. Н., Насретдинов К. К. Параметры связи систем координат // Геодезия и картография. – 1996. - №8. – С. 6-7.

---

# МЕТОДЫ, ТОЧНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАВИГАЦИИ. ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ШТУРМАНА

---

ГРНТИ 78.21.41.19

## **ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОЛОЖЕНИЯ КРОМОК ФАРВАТЕРА НА ВЕРОЯТНОСТЬ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ**

**Б.Е. ИВАНОВ**  
(ГНИНГИ МО РФ)

*Выводятся зависимости для оценки вероятности навигационной безопасности плавания при наличии случайных и систематической погрешностей положения кромок фарватера. Доказывается возможность композиции случайной погрешности определения места судна, случайной и систематической погрешностей положения кромок фарватера при определении вероятности навигационной безопасности плавания.*

На безопасность плавания по фарватеру или в заданной полосе влияют погрешность определения места судна, а также погрешности положения кромок фарватера. Развитие технических средств навигации и особенно спутниковых навигационных систем при сохранении трудоемкости гидрографических работ привело к тому, что в настоящее время точность навигации может быть выше точности картографирования конкретного района. Это обуславливает необходимость учета неопределенности положения кромок фарватера при обеспечении безопасности плавания. Поскольку положение кромок фарватера может определяться как случайными погрешностями, так и погрешностью систематической, целесообразно рассмотреть их влияние на вероятность навигационной безопасности плавания. Такая задача решается ниже в трех вариантах: в первом варианте учитываются только случайные погрешности, во втором – только систематическая погрешность, а в третьем – как случайные, так и систематическая погрешности положения кромок фарватера.

Рассмотрим первый вариант решения задачи, когда учитываются случайные погрешности положения кромок фарватера.

Пусть на фарватере шириной  $2L$  с кромками  $A$  и  $B$  проложена линия пути судна на расстоянии  $r$  от оси  $O$  (рис. 1). Из-за случайных погрешностей  $l_1$  и  $l_2$ , имеющих плотности распределения  $\psi_1(l_1)$  и  $\psi_2(l_2)$ , кромки фарватера смещаются из точек  $A$  и  $B$  в точки  $A'$  и  $B'$ . Вследствие погрешности  $u$  определения места судна по направлению, перпендикулярному оси фарватера, с плотностью распределения  $f(u)$  место судна смещается из точки  $C$  в точку  $C'$ .

Если не учитывать погрешности положения кромок фарватера, то вероятность  $P_0$  навигационной безопасности плавания будет равна [1]

$$P_0 = \int_{-L-r}^{L-r} f(u) du. \quad (1)$$

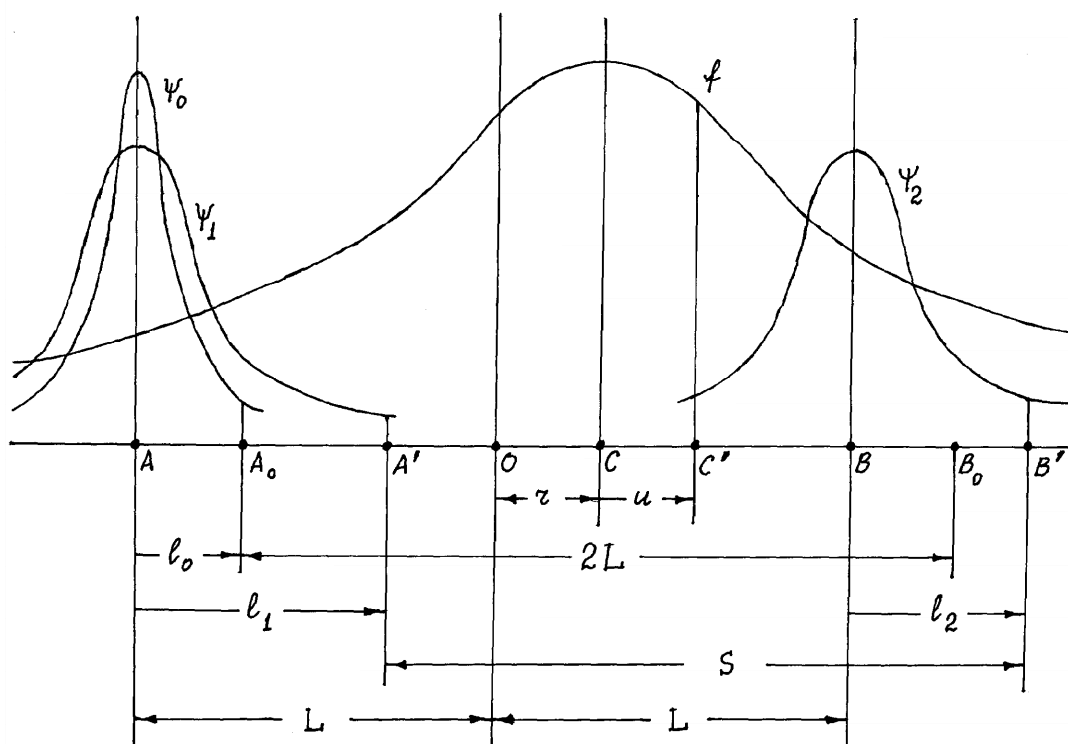


Рис. 1. Изменение плотностей распределения  $f$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  и  $\psi_0$  погрешности и определения места судна, проложенного на расстоянии  $r$  от оси  $O$  фарватера шириной  $2L$ , случайных погрешностей  $l_1$  и  $l_2$  и систематической погрешности  $l_0$  положения кромок  $A$  и  $B$  фарватера соответственно

При наличии случайных погрешностей положения кромок фарватера условная вероятность  $P^*$  может быть получена на основании формулы (1)

$$P^* = \int_{-L-r+l_1}^{L-r+l_2} f(u) du. \quad (2)$$

Безопасность плавания будет обеспечиваться в том случае, если фактическое расстояние между кромками фарватера не будет меньше заданного значения  $\Delta$ , что соответствует условию  $2L+l_2-l_1 \leq \Delta$ .

Тогда на основании формулы полной вероятности [2] вероятность  $P$  навигационной безопасности плавания в первом варианте решения задачи может быть выражена зависимостью:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_2(l_2) \int_{-\infty}^{2L+l_2-\Delta} \psi_1(l_1) \int_{-L-r+l_1}^{L-r+l_2} f(u) du dl_1 dl_2. \quad (3)$$



Вероятность  $P$  может быть представлена в виде разности  $P=P_1-P_2$ , составляющие которой равны:

$$P_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_2(l_2) \int_{-\infty}^{\infty} \psi_1(l_1) \int_{-L-r+l_1}^{L-r+l_2} f(u) du dl_1 dl_2, \quad (4)$$

$$P_2 = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_2(l_2) \int_{2L+l_2-\Delta}^{\infty} \psi_1(l_1) \int_{-L-r+l_1}^{L-r+l_2} f(u) du dl_1 dl_2. \quad (5)$$

Расчеты показали, что составляющая  $P_2$  намного меньше составляющей  $P_1$ , а их относительная разность, отнесенная к разности  $P_0-P_1$ , в большинстве случаев не превосходит 1%. В связи с этим с достаточной степенью точности можно вычислять  $P_1$  вместо  $P$ , что и делается в работе [3]. Преобразовав формулу (4), получим зависимость для оценки вероятности навигационной безопасности плавания при наличии случайных погрешностей положения кромок фарватера:

$$P_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_2(l_2) \int_0^{L-r+l_2} f(u) du dl_2 - \int_{-\infty}^{\infty} \psi_1(l_1) \int_0^{-L-r+l_1} f(u) du dl_1. \quad (6)$$

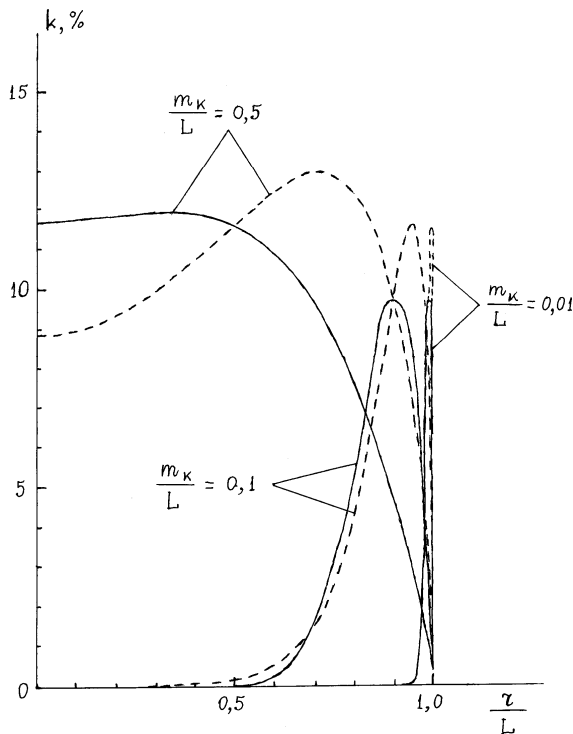


Рис. 2. Изменение степени влияния  $k$  погрешностей положения кромок фарватера на безопасность плавания в зависимости от расстояния  $r/L$  судна до оси фарватера и СКП  $m_k/L$  положения кромок фарватера, нормированных половиной ширины  $L$  фарватера

Для решения поставленной задачи необходимо знать закон распределения погрешностей определения места судна и положения кромок фарватера. В навигации широкое распространение нашло нормальное распределение. В то же время в методиках [4] в качестве закона распределения этих погрешностей предлагается использовать распределение Лапласа.

Степень влияния  $k$  погрешностей положения кромок фарватера на безопасность плавания можно оценивать по формуле

$$k = (P_0 - P_1) / P_0. \quad (7)$$

По формулам (6) и (7) были вычислены значения степени влияния при условии, что плотности распределения погрешностей положения кромок фарватера описываются одной функцией  $\psi(l)$  со средней квадратической погрешностью (СКП)  $m_k$  положения кромок фарватера. Изменение  $k$  в зависимости от отношений  $r/L$  и  $m_k/L$  показано на рис. 2 сплошной

линией для нормального распределения и штриховой линией для распределения Лапласа при СКП  $m_c$  определения места судна, равной  $m_k$ . Здесь видно,

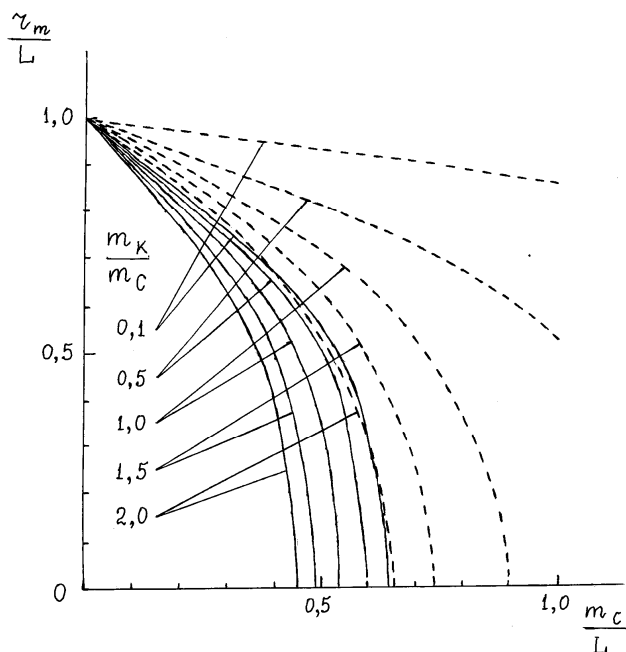


Рис. 3. Изменение расстояния  $r_m/L$  от оси фарватера, соответствующего наибольшему значению степени влияния  $k$  и нормированной половиной ширины  $L$  фарватера, в зависимости от СКП  $m_c/L$  определения места судна, нормированной половиной ширины  $L$  фарватера, и отношения  $m_k/m_c$  СКП положения кромок фарватера к СКП определения места судна

но, что при увеличении  $r/L$  степень влияния  $k$  сначала увеличивается, достигает наибольшего значения  $k_m$  при  $r_m/L$  и далее уменьшается. На рис. 3 показано изменение  $r_m/L$  в зависимости от  $m_c/L$  и  $m_k/m_c$  сплошной линией для нормального распределения и штриховой линией для распределения Лапласа. На этом рисунке видно, что при уменьшении как  $m_c/L$ , так и  $m_k/m_c$  значение  $r_m/L$  приближается к значению  $r/L=1$ , соответствующему положению судна на кромке фарватера.

По результатам вычислений получены среднее  $k_s$  и наибольшее  $k_m$  значения степени влияния  $k$  на фарватере при изменении  $r$  от 0 до  $L$ . Изменение  $k_s$  и  $k_m$  в зависимости от  $m_c/L$  и  $m_k/m_c$  показано на рис. 4 и рис. 5 сплошной линией для нормального

распределения и штриховой линией для распределения Лапласа. Изменение  $k_s$ , как показано на рис. 4, с достаточной степенью точности можно характеризовать как пучок лучей, исходящих из начала осей координат. Это особенно заметно при малых СКП, когда значения  $k_s$  для нормального распределения и для распределения Лапласа мало отличаются друг от друга. Характер изменения  $k_m$  другой. Как видно на рис. 5, при увеличении  $m_c/L$  значение  $k_m$  сначала практически не изменяется, а затем непрерывно возрастает.

Рассмотрим второй вариант решения задачи, когда учитывается систематическая погрешность положения кромок фарватера.

Пусть кромки фарватера имеют одинаковую погрешность  $l_0$  с плотностью распределения  $\psi_0(l_0)$ . Вследствие этой погрешности кромки фарватера смещаются из точек  $A$  и  $B$  в точки  $A_0$  и  $B_0$ . С учетом формулы (1) условная вероятность  $P^*$  равна:

$$P^* = \int_{-L-r+l_0}^{L-r+l_0} f(u) du. \quad (8)$$

Тогда на основании формулы полной вероятности [2] вероятность  $P$  навигационной безопасности плавания в этом варианте решения задачи может выражаться зависимостью

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_0(l_0) \int_{-L-r+l_0}^{L-r+l_0} f(u) du dl_0. \quad (9)$$

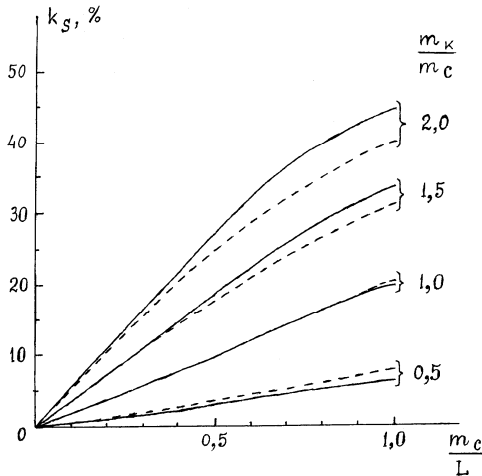


Рис. 4. Изменение среднего значения  $k_s$  степени влияния  $k$  в зависимости от СКП  $m_c/L$  определения места судна, нормированной половиной ширины  $L$  фарватера, и отношения  $m_k/m_c$  СКП положения кромок фарватера к СКП определения места судна

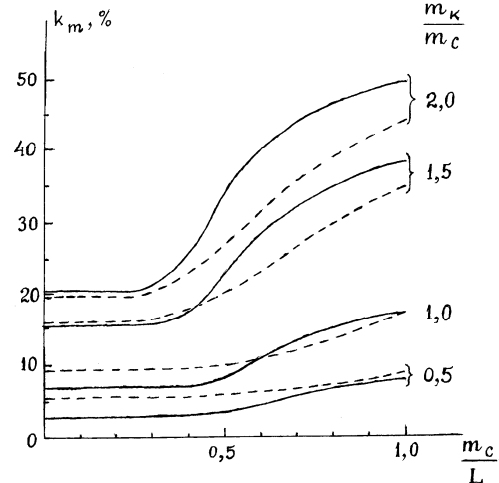


Рис. 5. Изменение наибольшего значения  $k_m$  степени влияния  $k$  в зависимости от СКП  $m_c/L$  определения места судна, нормированной половиной ширины  $L$  фарватера, и отношения  $m_k/m_c$  СКП положения кромок фарватера к СКП определения места судна

Если в первом варианте решения задачи принять, что плотности распределения погрешностей положения кромок фарватера описываются одной функцией  $\psi(l)$ , идентичной функции  $\psi_0(l_0)$ , то формула (6) будет в точности соответствовать зависимости (9). Однако это не означает, что случайные погрешности  $l_1$  и  $l_2$  будут равны, а первый и второй варианты решения задачи будут иметь одинаковую основу. На самом деле в первом варианте имеют место две погрешности  $l_1$  и  $l_2$  и переменная ширина  $S$  фарватера, а во втором варианте – одна погрешность  $l_0$  и постоянная ширина  $2L$  фарватера (рис. 1). Кроме того, даже при использовании единой плотности распределения  $\psi(l)$  значения вероятности навигационной безопасности плавания в двух вариантах решения задачи можно считать численно равными только с определенной степенью приближения, их разность будет соответствовать величине  $P_2$ .

Тогда рис. 2-5, полученные для первого варианта решения задачи, можно отнести и ко второму варианту.

В то же время второй вариант решения задачи характеризуется смещением фарватера относительно фиксированного места судна на величину  $l_0$ , что равносильно смещению места судна относительно фиксированного положения фарватера на такую же величину [1]. Тогда вероятность навигационной безопасности плавания во втором варианте может оцениваться по формуле (1) при условии, что  $f(u)$  будет представлять собой плотность распределения суммарной погрешности определения места судна, соответствующей композиции погрешности определения места судна и систематической погрешности положения кромки фарватера. Суммарная СКП может вычисляться по формуле

$$m = \sqrt{m_C^2 + m_{КО}^2}, \quad (10)$$

где  $m_{КО}$  – среднее квадратическое значение систематической погрешности положения кромок фарватера.

Если составляющие погрешности подчиняются нормальному распределению, то и суммарная погрешность будет подчинена нормальному распределению, а вероятность может вычисляться с помощью таблиц интеграла вероятностей [2]. В случае если составляющие погрешности подчиняются распределению Лапласа, плотность распределения суммарной погрешности и вероятность могут быть определены по формулам из работы [5].

Завершая рассмотрение второго варианта решения задачи, следует сформулировать важное положение. Если в первом варианте плотности распределения погрешностей положения кромок фарватера описываются одной функцией, что может быть принято без ущерба для практических расчетов, то вероятность навигационной безопасности плавания может оцениваться по формулам (1) и (10) так же, как во втором варианте решения задачи. При этом в формулу (10) необходимо подставить  $m_K$  вместо  $m_{КО}$ , а вычисляемая по этой формуле величина не будет являться характеристикой суммарной погрешности определения места судна, а будет служить в качестве формального параметра для вычисления вероятности.

Рассмотрим третий вариант решения задачи, когда учитываются как случайные, так и систематическая погрешности положения кромок фарватера.

По аналогии со вторым вариантом вероятность навигационной безопасности плавания в этом случае может оцениваться по формуле (1) при условии, что  $f(u)$  будет представлять собой плотность распределения композиции погрешности определения места судна, случайной и систематической погрешностей положения кромок фарватера. Среднее квадратическое отклонение  $m$  композиции может вычисляться по формуле

$$m = \sqrt{m_C^2 + m_K^2 + m_{КО}^2}. \quad (11)$$

Если составляющие погрешности подчиняются нормальному распределению, то и композиция их будет подчиняться нормальному распределению. В случае если составляющие погрешности подчиняются распределению Лапласа, то в соответствии с работой [5] плотность распределения  $f(u)$  композиции может выразиться зависимостью

$$f(u) = \frac{1}{2} \frac{\alpha\beta\gamma}{\alpha^2 - \beta^2} \left\{ \frac{\alpha}{\beta^2 - \gamma^2} \left[ \beta e^{-\gamma|u|} - \gamma e^{-\beta|u|} \right] - \frac{\beta}{\alpha^2 - \gamma^2} \left[ \alpha e^{-\gamma|u|} - \gamma e^{-\alpha|u|} \right] \right\}, \quad (12)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – параметры распределения Лапласа, характеризующие плотности распределения погрешности определения места судна, случайной и систематической погрешностей положения кромок фарватера соответственно.

Параметры распределения Лапласа равны  $\alpha = \sqrt{2}/m_c$ ,  $\beta = \sqrt{2}/m_k$  и  $\gamma = \sqrt{2}/m_{KO}$ .

Интегрируя выражение (12) в пределах от 0 до заданного значения  $u$ , получим вероятность  $P(u)$  попадания композиции составляющих погрешностей в заданный интервал

$$P(u) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{\alpha\beta\gamma}{\alpha^2 - \beta^2} \left\{ \frac{\alpha}{\beta^2 - \gamma^2} \left[ \frac{\beta}{\gamma} e^{-\gamma u} - \frac{\gamma}{\beta} e^{-\beta u} \right] - \frac{\beta}{\alpha^2 - \gamma^2} \left[ \frac{\alpha}{\gamma} e^{-\gamma u} - \frac{\gamma}{\alpha} e^{-\alpha u} \right] \right\}. \quad (13)$$

Функция  $P(u)$  может играть такую же роль при использовании распределения Лапласа, как и интеграл вероятностей при использовании нормального распределения, и может применяться для оценки вероятности навигационной безопасности плавания по фарватеру.

На основании вышеизложенного можно предложить следующий порядок действий при оценке вероятности навигационной безопасности плавания по фарватеру.

1. По формуле (11) вычисляется среднее квадратическое отклонение  $m$  композиции составляющих погрешностей.

2. По таблицам интеграла вероятностей для нормального распределения или по формуле (13) для распределения Лапласа определяются вероятности  $P(L+r)$  и  $P(L-r)$  попадания композиции составляющих погрешностей в интервалы  $L+r$  и  $L-r$  соответственно.

3. По формуле  $P = P(L+r) + P(L-r)$  вычисляется вероятность  $P$  навигационной безопасности плавания по фарватеру.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Б. Е. Об оценке вероятности навигационной безопасности плавания по фарватеру // Навигация и гидрография. - 2000. - № 11. - С. 40-45.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 3-е изд., испр. - М.: Наука, 1964. – 576 с.
3. Иванов Б. Е. Влияние неопределенности положения кромок фарватера на безопасность плавания // Записки по гидрографии. - 2000. – № 249. – С. 25-30.
4. Методики вероятностных расчетов при решении навигационных задач на кораблях и судах ВМФ (МВР-96). – СПб.: ГУНиО МО, 1999. – 218 с.
5. Иванов Б. Е. Об особенностях решения навигационных задач при использовании распределения Лапласа // Навигация и гидрография. – 2001. №12. – С. 67-69.

### **О НОВОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ЮСТИРОВКИ БОРТОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ**

**Н. И. ЛЕДЕНЁВ**  
(ГНИНГИ МО РФ)

*Рассматривается новый способ определения истинной скорости подводной лодки, находящейся в подводном положении, основанный на применении гидроакустических донных маяков. Анализируются требования к точности измерительных процедур при реализации метода.*

Для юстировки бортовых измерителей скорости подводных лодок (ПЛ) в подводном положении традиционно применяются кабельные и гидроакустические веерные мерные линии [1]. Однако в последнее время использование этих способов на действующих ПЛ, особенно дизельных, связано с определенными трудностями. В первую очередь, это обусловлено выработкой ресурса кабельных мерных линий на флотах и сокращением ассигнований на нужды ВМФ. Аппаратура для этих мерных линий была разработана в 60-70-х годах XX века и производилась на предприятиях союзных республик бывшего СССР. Так, например, на Балтийском флоте вообще отсутствует кабельная мерная линия. Поэтому становится практически невозможным поддерживать эксплуатационную готовность кабельных мерных линий и обеспечивать работы на гидроакустических веерных мерных линиях. Именно поэтому актуальной становится задача обоснования и разработки нового способа определения истинной скорости относительно грунта, который позволил бы сократить материальные затраты на его осуществление. Анализ известных методов юстировки относительных лагов в подводном положении показал, что ни один из них не может быть использован для юстировки измерителей относительной скорости ПЛ из-за организационно-экономических проблем и относительно низкой точности.

Юстировка бортовых измерителей скорости подводных лодок (относительных и абсолютных лагов, инерциальных навигационных систем средней точности) производится периодически в процессе их эксплуатации для поддержания точности измерения скорости корабля на заданном уровне.

Юстировка измерителей скорости включает в себя:

- определение истинного значения относительной скорости корабля и значения относительной скорости по измерителю;
- расчет и ввод поправок;
- определение остаточных погрешностей измерителей.

При этом наиболее сложной задачей является определение истинной относительной скорости корабля. В связи с тем, что истинное значение измеряемой величины всегда остается неизвестным, на практике пользуются действительным значением, определяемым экспериментально и настолько приближающимся к истинному, что для данной конкретной цели оно может быть принято вместо него [2]. Поэтому в дальнейшем под истинным понимается именно действительное значение относительной скорости корабля.

В большинстве случаев существующие средства и способы обеспечивают измерение истинной скорости корабля относительно грунта. При этом для определения истинной относительной скорости при юстировке измерителей скорости известными способами исключают скорость течения [2, 3].

Таким образом, говоря о разработке новых методик юстировки измерителей скорости, в первую очередь следует иметь в виду необходимость разработки новых методов определения истинной скорости корабля относительно грунта. Это и заставило начать поиск новых, более экономичных методов определения истинной скорости подводных лодок в подводном положении относительно грунта.

В результате исследований, проведенных ГНИНГИ МО России и ЗАО «Аквamarin» совместно с автором статьи был разработан способ определения истинной скорости ПЛ в подводном положении по измеренным временам распространения сигналов, по трассе ПЛ - гидроакустический донный маяк (ГДМ). Разработка данного метода стала возможна благодаря созданию гидроакустической аппаратуры маяков со среднеквадратической погрешностью измерения времени распространения сигнала на уровне 0,5 мс.

Для реализации метода необходимо иметь следующее обеспечение:

- предварительно установленные на грунте два ГДМ с привязкой к географической системе координат с известной длиной базы и глубиной установки;
- переносную или стационарную корабельную аппаратуру, обеспечивающую запрос ГДМ, приём ответных сигналов, определение времени распространения акустических сигналов по трассе и проведение необходимых расчётов.

На полигоне ГДМ располагают в точках  $A_1$  и  $A_2$  (рис. 1) на расстоянии  $S$  так, чтобы направление базы  $П_S$  приблизительно совпадало с направлением течения в данном районе. Постановку маяков производят в точках, обеспечивающих значения  $S$ , приведенные в табл. 1 [2]. После постановки маяков значения  $S$  и  $П_S$  уточняют известными способами [4].

Для измерения длины пробега на разных скоростных режимах целесообразно таким образом устанавливать три ГДМ, чтобы расстояния между секущими направлениями между ГДМ №1 и ГДМ №2 было 0,5 мили, между ГДМ №1 и ГДМ №3 - 3 мили.

Таблица 1

Соответствие расстояния между секущими направлениями и скоростью ПЛ (приближенное)

Скорость ПЛ, уз	6	12	18	24	30	36	42	50
Расстояние $S$ , мили	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0

В полигоне для юстировки ПЛ ложится на курс, параллельный направлению базы  $П_S$  (рис. 1), и развивает назначенную скорость.

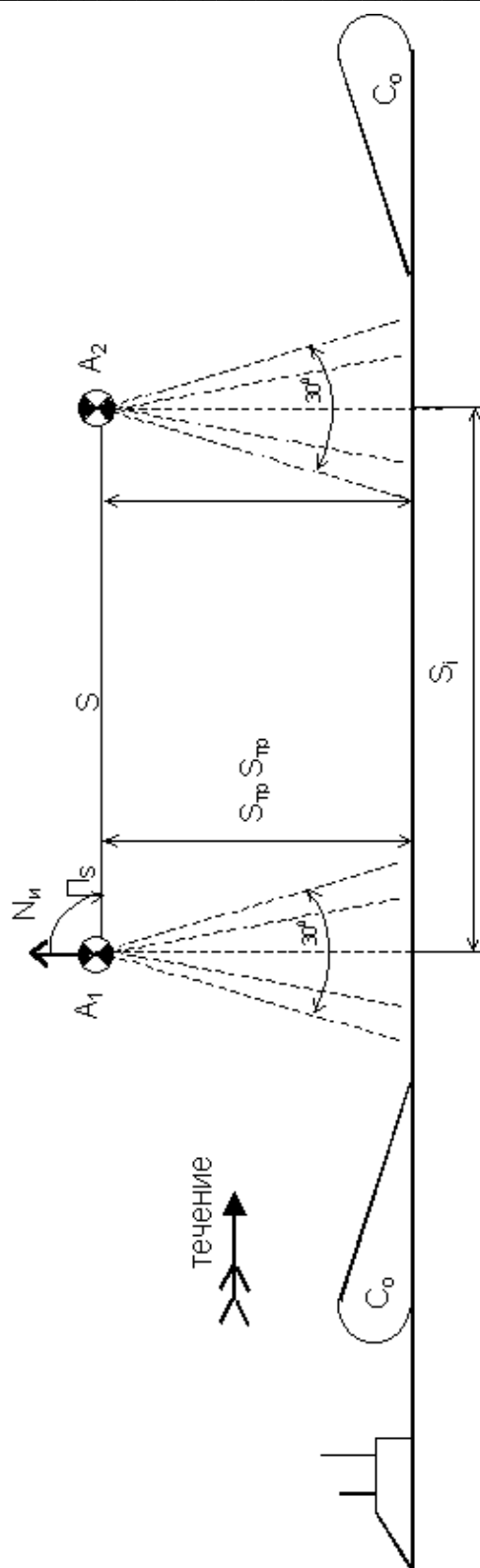


Рис. 1. Маневрирование подводной лодки при реализации метода определения скорости пл по измеренным временам прохождения сигнала до гидроакустических донных маяков.  $A_1$  и  $A_2$  — донные гидроакустические маяки



В момент подхода к траверзу первого (А<sub>1</sub>) ГДМ его начинают запрашивать с помощью корабельной аппаратуры через равные промежутки времени  $\Delta t \cong 5$  с. Корабельная аппаратура принимает излучаемые ГДМ сигналы и измеряет  $\tau_i$  время их распространения. В момент прохождения ПЛ траверза маяка значение  $\tau$  будет **минимальным**. Для уточнения момента прохождения траверза продолжают запросы и прием сигналов первого ГДМ с последующей аппроксимацией и нахождением минимума функции:  $\tau = F(t)$  (рис. 2).

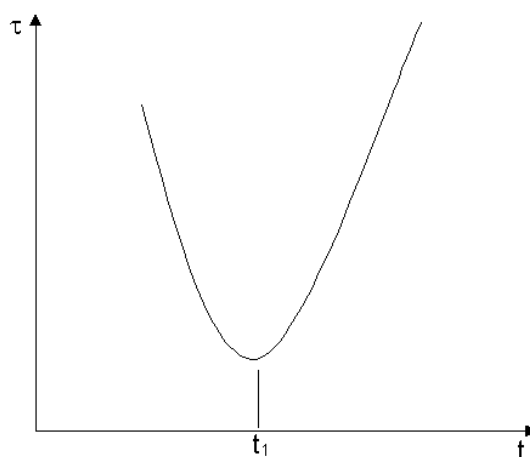


Рис. 2. Аппроксимация значений  $\tau_i$  для определения момента  $t_1$  прохождения траверза маяка

В процессе вычислительных процедур фиксируется момент времени  $t_1$  прохождения траверза первого маяка.

После этого работу с первым ГДМ прекращают и продолжают движение ко второму ГДМ. При подходе ко второму ГДМ все описанные процедуры повторяются и определяют момент  $t_2$  прохождения ПЛ его траверза.

По известной базе  $S$  и разности моментов времени прохождения траверзов ГДМ рассчитывают истинную скорость ПЛ на пробеге [2].

Рассмотрим требования к точности измерительных процедур при реализации метода. Для примера рассмотрим вариант юстировки относительно лага подводной лодки.

Примем среднеквадратическую погрешность относительного лага  $m_{v_{\text{пл}}} = 0,025$  м/с. Следовательно, в соответствии с [1-3] погрешность определения эталонной относительной скорости должна составлять:

$$m_{v_0} = \frac{1}{3} m_{v_s} \cong 0,008 \text{ м/с,}$$

а погрешность определения истинной скорости на пробеге (при трёх взаимно-обратных пробегах)

$$m_{v_u} = m_{v_0} / 0,61 = 0,013 \text{ м/с.}$$

Из [2, 3] известно, что погрешность определения истинной скорости на пробеге определяется как

$$m_{v_u}^2 = \left( \frac{m_s}{T} \right)^2 + \left( \frac{m_t \times S \times \sqrt{2}}{T^2} \right)^2, \quad (1)$$

где  $m_s$  - СКП определения длины пробега;

$m_t$  - СКП определения времени пробега (в нашем случае – прохождения траверзов ГДМ).

Из (1) следует, что для исключения влияния на точность измерения истинной скорости второго слагаемого должно выполняться условие  $m_t \times S \times \sqrt{2} / T^2 \leq 1 / 3m_{V_u}$ . Таким образом, при длине базы  $S = 1,5$  мили и движении ПЛ со скоростью  $V = 18$  уз ( $T = 300$  с):

$$m_t = \frac{m_{V_u} \times T}{3V \times \sqrt{2}} \leq 0,1 \text{ с.} \quad (2)$$

Если условие (2) выполняется, то из (1) можно найти требуемую погрешность определения длины пробега:

$$m_S = m_{V_u} \times T = 3,9 \text{ м.}$$

Из [2] известно, что погрешность  $m_S$  при траверзном методе определяется выражением:

$$m_S = \left[ (m'_s)^2 + (2,5 \times 10^{-3} \times S_{mp} \times m_\theta)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где:  $m'_s$  - СКП определения длины базы  $S$ ;

$S_{mp}$  - траверзное расстояние от корабля до ГДМ;

$m_\theta$  - угловая погрешность определения прохождения траверза.

Длина базы  $S$  должна определяться при постановке ГДМ в полигоне. Ее определение может производиться с обеспечивающего судна, выполняющего  $n$  галсов, курсами, перпендикулярными  $\Pi_s$  (рис. 3), проложенными примерно посередине базы.

На каждом галсе с обеспечивающего судна при помощи переносной корабельной аппаратуры определяют расстояния  $d_1$  и  $d_2$  до ГДМ  $A_1$  и  $A_2$ , соответственно:

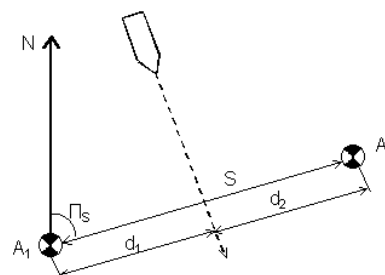


Рис. 3. Галс обеспечивающего судна при определении длины базы  $S$

$$d_1 = \frac{c\tau_1}{2}; \quad d_2 = \frac{c\tau_2}{2}, \quad (4)$$

где:  $C$  - скорость распространения звука в воде;

$\tau_1$  и  $\tau_2$  - время распространения сигналов запроса и ответов ГДМ.

Из (4) имеем (приняв для простоты  $d_1=d_2$ )

$$m'_s = 0,71 \left[ (m_c \times S / c)^2 + (m_\tau \times c)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

где:  $m_c$  - СКП определения скорости звука;

$m_\tau$  - СКП измерения времени распространения сигналов корабельной аппаратурой.

При определении момента прохождения траверза по минимальной траверзной дистанции  $S_{mp}$  (рис. 2) угловая погрешность  $m_\theta$  может быть выражена через погрешность  $m_{S_{mp}}$  измерения траверзного расстояния как

$$m_\theta = \arccos\left(1 + m_{S_{mp}} / S_{mp}\right)^{-1}. \quad (6)$$

Погрешность  $m_{S_{mp}}$  при использовании гидроакустического метода определения дистанции определяется как

$$m_{S_{mp}} = \left[ \left( m_c \times S_{mp} / c \right)^2 + \left( c \times m_\tau \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (7)$$

С учетом того, что при организации юстировки момент прохождения траверза определяется не по измеряемым абсолютным дальностям до ГДМ, а по времени распространения сигналов, погрешность  $m_c$  в формуле (7) можно не учитывать:

$$m_{S_{mp}} = c \times m_\tau. \quad (8)$$

В настоящее время скорость звука в корабельных условиях может быть определена с погрешностью  $m_c \leq 0,5$  м/с [5]. Опыт разработки и использования навигационных гидроакустических систем с ГДМ позволяет утверждать, что время распространения гидроакустических сигналов может быть измерено с погрешностью  $m_\tau \leq 0,5$  мс. Исходя из этого, в табл. 3 приведены оценки погрешности  $m_S$  на гидроакустической траверзной мерной линии с ГДМ в зависимости от траверзного расстояния  $S_{mp}$ , полученные из (1)-(8). При расчетах принято  $m_c = 0,5$  м/с и  $m_\tau = 0,5$  мс.

Таблица 2

Погрешности определения длины пробега на гидроакустической траверзной мерной линии с базой S=1,5 мили

$S_{mp}$ , м	100	250	500
$m'_S$ , м	1,2		
$m_S$ , м	2,12	3,02	4,10

Таким образом, для юстировки относительного лага в подводном положении аппарата гидроакустической траверзной мерной линии должна обес-

печивать измерение времени распространения гидроакустических сигналов с погрешностью  $m_t \leq 0,5$  мс и определять время прохождения траверзов ГДМ с погрешностью  $m_t \leq 0,1$  с. Вместе с тем при оборудовании полигона для юстировки должна определяться скорость распространения звука в воде с погрешностью  $m_c \leq 0,5$  м/с, а измерительные галсы в ходе юстировки должны проходить с учетом обеспечения траверзных дистанций до ГДМ  $S_{mp} \leq 500$  м.

Предлагаемый метод с использованием ДГМ обеспечит проведение около 1000 процедур юстировки лагов без переоборудования полигона. Расчёты показывают, что экономический выигрыш от применения описанного метода в сравнении с традиционными способами (гидроакустическая веерная мерная линия) по критерию эффективность /стоимость составит 10-12 раз.

Техническая реализация описанного метода позволит иметь на флотах систему, эффективную с точки зрения точности, стоимости эксплуатации и малого времени развёртывания (оборудования) полигона для проведения юстировки бортовых измерителей скорости ПЛ ( в основном относительных лагов всех модификаций), которая заменит кабельные и веерные гидроакустические подводные мерные линии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Правила определения маневренных элементов кораблей Военно-Морского флота (ПОМЭК-85). Изд-во ГУНиО МО, 1987. - 199 с.
2. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. - М.: Изд-во стандартов, 1972. - 280 с.
3. Абсолютные и относительные лаги/ Виноградов К. А., Кошкарев В. Н.и др. - Л.: Судостроение, 1990. – 285 с.
4. Инструкция по оборудованию районов маяками-ответчиками навигационных гидроакустических систем. - Изд. ГУНиО МО, 1984 (адм. № 9170). – 52 с.
5. Справочник по гидроакустике. - Л.: Судостроение, 1982. – 48 с.

**О ПОСТРОЕНИИ ТРЕХМЕРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕСТНОСТИ НА  
ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ**

**А. Л. ГОЛУБЕВА,  
Т. В. САЗОНОВА**  
(ФНПЦ ОАО РПКБ)

*Статья посвящена построению трехмерного изображения местности с учетом возможностей бортовых компьютеров. Рассмотрены алгоритмы и приведены примеры их реализации для конкретных бортовых вычислительных машин. Предложены также новые методы построения трехмерного изображения и сформулированы требования к аппаратному и картографическому обеспечению бортового компьютера.*

Для снижения психофизической нагрузки экипажа летательного аппарата при выполнении основных режимов полета на экран бортового индикатора выводится трехмерное изображение рельефа впередилежащей местности.

Способ построения трехмерного изображения тесно связан с возможностями бортовой вычислительной машины и составом картографической информации.

В бортовой графической станции (БГС) разработки ФНПЦ ОАО РПКБ были реализованы алгоритмы, представляющие трехмерный рельеф в виде однотонно «залитой» сетки, натянутой на впередилежащую местность (ВЛМ), с нанесенными на нее отдельными объектами.

БГС - специализированная бортовая цифровая вычислительная машина с двумя независимыми видеоканалами. На выходе этих каналов формируются R, G, B-сигналы для синтеза на экране индикатора двухмерного и трехмерного изображения. Основными функциональными модулями БГС являются:

- модуль центрального процессора (МЦП);
- модуль графического процессора (МГП);
- сменный модуль энергонезависимой памяти (МПЭ).

МЦП построен на базе микропроцессора типа 80486DX2 с тактовой частотой работы 50 МГц. МГП построен на базе микропроцессора 180860XR с тактовой частотой работы 25 МГц, объем ОЗУ -1 Мбайт, объем видеоОЗУ - 1 Мбайт, цветовая палитра - 64 цвета. МПЭ предназначен для хранения картографической информации и имеет общий объем 256 Мбайт.

Для рассматриваемых алгоритмов информация о рельефе была записана в виде матрицы высот, а информация об объектах - в линейном формате. Последняя включает классификационный код, метрику объекта, абсолютные высоты узловых точек контура. Подготовка этих карт выполняется с использованием цифровых карт крупных масштабов по разработанным в ФНПЦ ОАО РПКБ технологиям. Исходные форматы карт содержат множество объектов. Обработать большое их число на борту невозможно, и, кроме того, нет необходимости в таком подробном изображении. Поэтому при подготовке карт по специально разработанному классификатору из исходных данных выбираются объекты, позволяющие экипажу легко ориентироваться на мест-

ности (дороги, реки и т.п.), а также все высотные объекты (линии электропередач, здания, леса и т.п.).

Вычислительная система БГС не дает возможности построения трехмерного кадра на аппаратном и микропрограммном уровне. Поэтому чтобы достаточно быстро формировать подобное довольно сложное изображение в виде «залитой» сетки рельефа с нанесенными объектами, были разработаны специальные алгоритмы. Они уменьшают число обрабатываемых полигонов, особым образом формируя пирамиду видимости. Сетка создается наложением на вперёдидлежащую местность (в пределах пирамиды видимости) сечений по дальности и сечений по углу азимута. Рельеф в узловых точках ПВ рассчитывается методом билинейной интерполяции. В стандартных методах при использовании регулярной матрицы рельефа приходится обрабатывать очень много полигонов, число которых к тому же резко возрастает при увеличении дальности. Если поместить точку, в которой пересекаются сечения по азимуту, позади точки наблюдения, то создается иллюзия проекции на экран прямоугольной сетки, при этом количество полигонов резко снижается. С той же целью, начиная с некоторой дальности, шаг сечений по дальности можно увеличивать, например, в арифметической прогрессии. Все перечисленные особенности позволяют значительно повысить скорость построения кадра.

Удаление невидимых граней обеспечивается за счет построения изображения, начиная с заднего плана.

Самое трудоемкое в рассматриваемом методе создания трехмерного изображения - построение объектового состава.

На больших дальностях рисовать отдельные объекты не имеет смысла: слишком мал угол зрения и для безопасного пилотирования несущественны детали местности на дальнем плане. Поэтому ВЛМ подразделяется на два поля: ближнее с изображением объектов и дальнее без объектов. Размер (дальность) ближнего поля определяется в основном физиологической способностью летчика концентрировать внимание на местности, упрежденной на 10 сек. полета. Дальнее поле определяется дальностью видимости.

Ограниченность цветовой палитры и вычислительных возможностей не позволяет изображать объекты очень подробно (с наложением текстур и т.п.). Однако даже изображение в виде простых геометрических фигур дает наблюдателю представление о типе объекта и, что важно, о его высоте. Для каждой группы объектов было определено условное графическое обозначение – простые фигуры (призма, параллелепипед, пирамида, ломаный параллелепипед) и сложные, состоящие из нескольких простых. Параметры объектов (высота, ширина, длина) записаны в базе данных картографической информации.

Объекты (объемные геометрические фигуры) задаются в системе координат, связанной с земной поверхностью, пересчитываются для каждого положения наблюдателя в систему координат наблюдателя и проецируются на экран. Положение объекта относительно наблюдателя меняется при движении ЛА, при этом наблюдатель может видеть одни грани объекта и не видеть другие, поэтому во время построения фигуры определяется видимость ее

граней. При построении сложного объекта необходимо также решать задачу ранжирования подобъектов.

При формировании трехмерного кадра использует как двумерное отсечение многоугольников и полилиний (например, контуры объектов, попавших в пирамиду видимости, отсекаются плоским окном, которое представляет собой проекцию пирамиды видимости на горизонтальную плоскость), так и трехмерное кадрирование. Плоскость или вектор, заданные в системе координат наблюдателя, сначала отсекаются гранями пирамиды видимости, затем проецируются на экран. Таким образом, отсечение и получение проекции точки на экран объединены в одну процедуру. Это дает возможность избежать ошибок в центральной проекции точки, например, при нулевых дальностях.

Для некоторых площадных объектов типа жилой застройки, леса изображение в виде сплошной призмы оказалось слишком громоздким. Другой вариант их изображения - контур объекта, «натянутый» на рельеф. Чтобы дать представление о высоте объекта, показываются отдельные «деревья», «дома» и т.п. внутри этого контура. Линии электропередач отображаются пирамидами, представляющими опоры, и соединяющими их линиями.

Начиная с некоторой дальности, объекты можно рисовать плоскими, передавая информацию в основном о высоте. Разница между плоским и объемным изображением не будет заметна, а вывод информации упростится.

Пример трехмерного изображения в виде сетки рельефа с нанесением объектов в виде условных геометрических тел приведен на рис. 1.

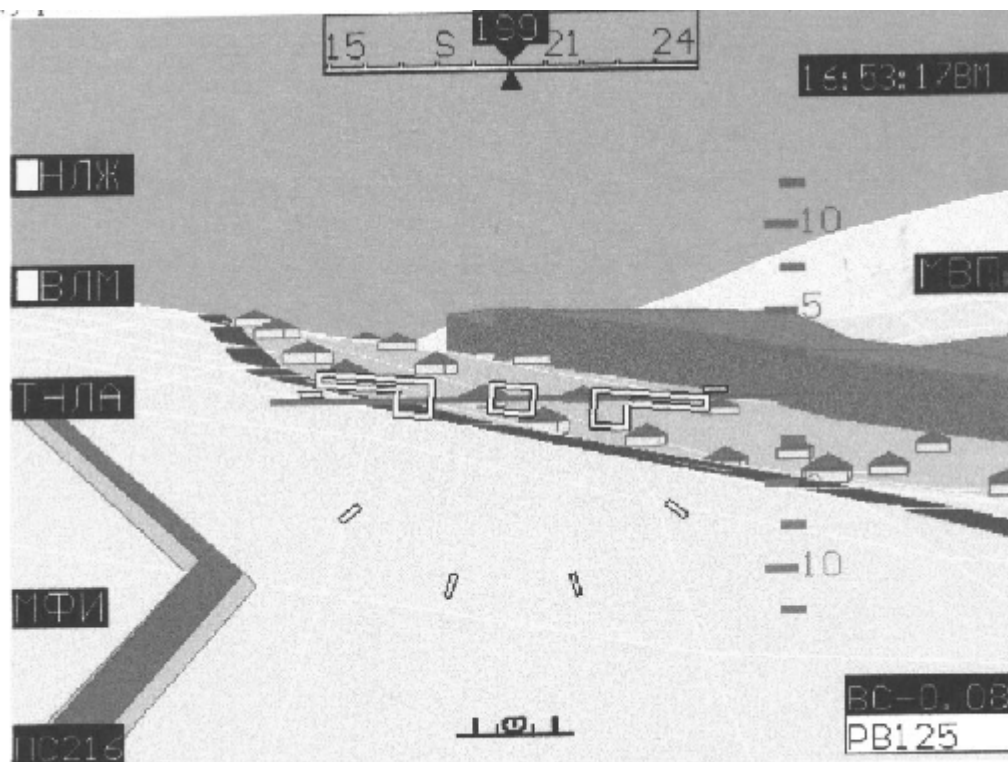


Рис. 1. Изображение рельефа в виде сетки с нанесением объектов

Более простой вид трехмерного изображения - не «залитая» монохромная сетка без объектов - был реализован в многофункциональном индикаторе (МФИ) разработки ФНПЦ ОАО РПКБ. В него входят центральный и графический процессоры, а также Flash-память, позволяющая хранить картографическую информацию.

В этом случае используется алгоритм «плавающего горизонта», удаляющий «невидимые» линии. Главная особенность этого алгоритма заключается в сведении трехмерной задачи к двумерной путем пересечения исходной поверхности последовательностью параллельных плоскостей. Такое изображение поверхности очень близко к нашему представлению ВЛМ, на которую пирамида видимости накладывает сечения по дальности. Более того, эти сечения уже упорядочены по одной координате (дальности).

Алгоритм предполагает построение рельефа с переднего плана - с сечения, ближайшего к точке наблюдения.

При таком способе имитации трехмерности невозможно изобразить объекты, однако их высоты учитываются при формировании сетки. В состав картографической информации входит матрица высот псевдорельефа (равная сумме высот рельефа и объекта), что упрощает формирование изображения с учетом высот объектов.

Сетка графически строится достаточно просто, поэтому для подобного трехмерного изображения даже при ограниченных аппаратных возможностях достигается высокая частота обновления кадра.

Трехмерное изображение, реализованное рассмотренными выше методами, имеет существенные недостатки - низкую частоту обновления кадра и вид местности, далекий от реального. При ориентации сетки по текущему курсу ЛА высоты рельефа в узлах сетки рассчитываются для каждого положения пирамиды видимости. В случае если последовательные положения пирамиды видимости сильно отличаются друг от друга, что характерно, например, для движения ЛА по криволинейным траекториям, по ВЛМ «пробегают волна».

Исследования, проводимые при реализации этих методов, показывают, что трехмерное изображение, выводимое на бортовой индикатор, должно с большей реалистичностью отображать ВЛМ. Это повышает эргономичность трехмерного кадра.

Подобные изображения достаточно давно строятся в специализированных графических станциях и графических пакетах, используемых на персональных компьютерах. Суммируя накопленный в этой области опыт и опыт построения трехмерного изображения в бортовых компьютерах, можно предложить следующий способ формирования кадра. Картографическая информация о рельефе в данном случае хранится не в виде матрицы высот, а в виде множества полуграней, аппроксимирующих земную поверхность в заданном районе. Представление рельефа в виде плоскостей позволяет «натягивать» на поверхность текстуры. Для удаления невидимых областей используется Z-буфер.

Такой подход к построению трехмерного изображения повышает требования к картографическому, аппаратному и программному обеспечению.



В ходе наземной подготовки необходимо матрицу высот, являющуюся исходной информацией о рельефе, преобразовать в требуемую нерегулярную форму. Эта математическая задача разбиения поверхности на треугольники может быть решена различными способами. Для более сложного и реалистичного представления ВЛМ должен быть создан банк текстур, характеризующих тип поверхности, объекта, возможно, времени года.

Как Z-буфер, так и использование текстур, эффективны только при условии реализации их аппаратно или за счет программирования на низком уровне специализированных процессоров. Часть расчетов при формировании трехмерного кадра также должна выполняться на микропрограммном уровне. Текстуры, очевидно, могут способствовать созданию реалистичного изображения только при многоцветной палитре.

Предложенная технология построения трехмерного изображения была апробирована методом математического моделирования на персональном компьютере. В качестве картографической информации использовалась матрица рельефа горной местности и текстура, взятая из банка данных графической станции «Силикон». Текстура была преобразована в необходимый формат, однако палитра текстуры содержала только 256 цветов.

На рис. 2 приведен трехмерный вид горного ландшафта, полученный в результате моделирования с использованием усовершенствованных алгоритмов.



Рис. 2. Изображение рельефа с помощью текстур

Сравнение видов, изображенных на рис. 1 и 2, показывает, что предлагаемые алгоритмы в большей степени отвечают требованиям реалистичности, и, следовательно, эргономичны, что снижает психофизическую нагрузку на летчика и тем самым позволяет повысить безопасность полета.

---

# НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

---

ГРНТИ 47.49.31

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УНИВЕРСАЛЬНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ (ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ) СИСТЕМЫ (АИС)**

**М. Б. СОЛОДОВНИЧЕНКО,  
Ю. М. УСТИНОВ,  
(ГМА им. адм. С. О. Макарова)  
А. Р. ШИГАБУТДИНОВ  
(ЦНИИМФ)**

*Рассматриваются структурная схема АИС, режимы работы, форматы сигналов, виды формализованных сообщений, организация выбора временных каналов, зоны обслуживания.*

### **Введение**

В ближайшие годы с целью повышения безопасности плавания в открытом море и улучшения качества управления движением судов в прибрежных районах будет введена в действие новая навигационно-связная система, которая носит название **Автоматическая информационная (идентификационная) система (АИС)**. АИС работает в ОВЧ диапазоне. Судовая АИС сопряжена с приемоиндикатором (дифференциальной) глобальной навигационной спутниковой системы (Д)ГНСС и устанавливается как конвенционное средство на морских судах и судах смешанного (река-море) плавания. В качестве дополнительной компоненты АИС будет входить в существующую систему управления движением судов (СУДС) и на региональном уровне будет состоять из нескольких базовых АИС и регионального центра.

В центре управления движением судов дополнительно к существующему оборудованию будут устанавливаться береговые транспондеры\* АИС и аппаратура передачи дифференциальных поправок подсистемы (Д)ГНСС в ОВЧ диапазоне.

Базовые АИС обеспечивают обмен навигационно-связной информацией с судами самостоятельно, либо с помощью нескольких ретрансляционных станций. Информация с базовых станций передается по радио, радиорелейным, проводным, волоконно-оптическим каналам связи в центр СУДС, который имеет средства отображения местоположения судов с использованием электронной карты.

---

\* Примечание: Термин «транспондер» по отношению к АИС применяется в данной статье условно. Транспондер (transponder – (англ.) радиоответчик, приемоответчик, запросчик-ответчик) – прибор, срабатывающий при поступлении на него запроса или в случае его опроса. Этот термин больше подходит к аппаратуре ЦИВ, но не к АИС, который в автономном режиме работы является прибором непрерывного действия. В русско-язычном варианте термин для обозначения судовой АИС пока не определен.

Судовые АИС будут установлены:

- на всех судах валовой вместимостью 300 и более, совершающих международные рейсы;
- на грузовых судах валовой вместимостью 500 и более, не совершающих международные рейсы;
- на всех пассажирских судах независимо от их размера.

Время установки АИС в зависимости от тоннажа, вида судна и совершаемых рейсов определено с 1 июля 2002 г. по 1 июля 2008 г. В первую очередь судовые АИС будут устанавливаться на пассажирские суда и танкеры, в последнюю – на грузовые суда с валовой вместимостью 300 и более, которые не совершают международные рейсы.

Особенности внедрения и применения АИС подробно рассмотрены в работе [1]. Ниже на основе источников [2-6] приводятся основные технические возможности радиооборудования АИС.

### **Назначение оборудования АИС**

Автоматическая информационная (идентификационная) система предназначена для:

- передачи с судна навигационных данных в береговую систему управления движением судов для обеспечения надежной проводки судна;
- передачи навигационных данных о судне и его грузе в береговые службы при плавании в морском районе А1 ГМССБ;
- обмена навигационными данными между судами в открытом море с целью предупреждения столкновений.

Судовая АИС работает совместно с устройством отображения информации.

Конструктивно универсальный транспондер АИС выполняется в виде моноблока. Устройствами отображения информации для судовой АИС могут быть:

- дисплей электронной картографической навигационно-информационной системы (ЭКНИС);
- дисплей средства автоматической радиолокационной прокладки (САРП);
- дисплей радиолокационной станции (РЛС);
- система отображения информации с использованием с электронной карты.

В береговых центрах локальных СУДС устройствами отображения информации могут являться:

- дисплей береговых РЛС;
- компьютерные радиолокационные индикаторы с высокой разрешающей способностью.

Основные принципы построения универсального транспондера одинаковы для судовых и береговых АИС. Структурная схема судового универсального транспондера АИС представлена на рис. 1.

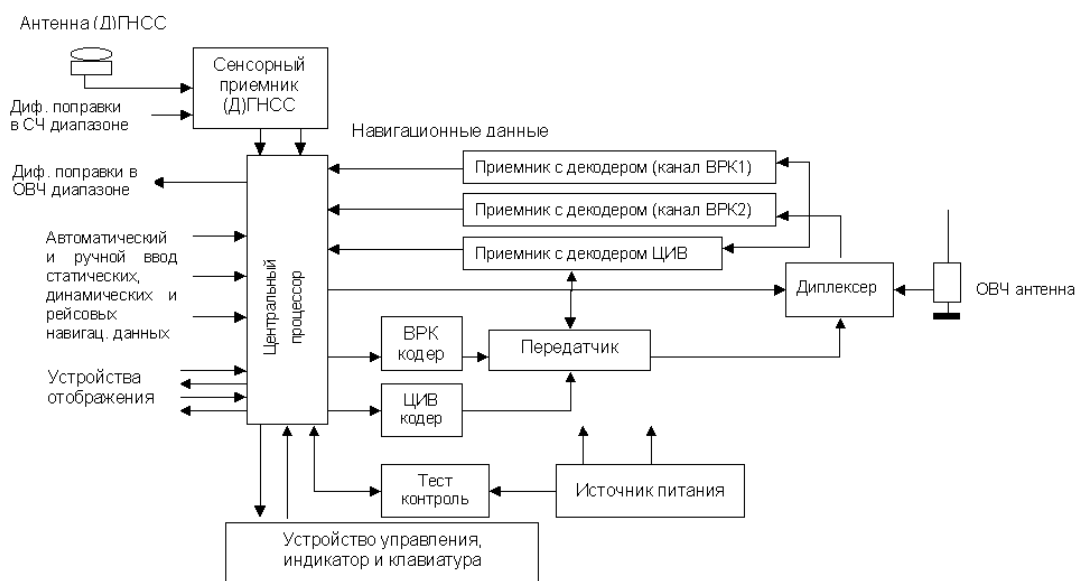


Рис. 1. Блок-схема судовой АИС

В состав судового транспондера АИС входят:

- процессор с устройством обмена;
- сенсорный приемник (Д)ГНСС;
- два приемника, обеспечивающих одновременный прием и декодирование сигналов на несущих частотах 161,957 и 162,025 МГц с временным разделением каналов (ВРК);
- приемник сигналов ЦИВ на 70-ом канале;
- передатчик, обеспечивающий (по выбору) излучение кодированных сигналов на несущих частотах 161,957 и 162,025 МГц и на 70-ом канале;
- диплексер, обеспечивающий работу трех приемников и одного передатчика на одну антенну;
- устройство тестового контроля, обеспечивающее непрерывный контроль функционирования аппаратуры;
- источник питания;
- устройство индикации и управления работой транспондера.

Предложенный состав приемо-передающих устройств позволяет организовывать как попеременный, так и одновременный симплексный обмен информацией судна с судном и дуплексный обмен судна с базовой станцией береговой службы [3].

Для регионального применения разрешается использовать частотные каналы в диапазоне 156,0 – 174,0 МГц, определенные Приложением 18 Регламента Радиосвязи СВЧ диапазона Морской подвижной службы 156,0 – 174,0 МГц.

Центральный процессор обеспечивает формирование кодовых последовательностей в сообщениях, синхронизацию последовательностей с системным временем ГНСС, обмен информацией с внешними датчиками (дисплеями, клавиатурой, гирокомпасом, лагом, тахометром и др.), ручной ввод данных. Встроенный сенсорный приемник (Д)ГНСС представляет собой не-

управляемую плату (без блока питания, дисплея) и служит для определения координат места и других навигационных параметров судна (путевой скорости, путевого курса и др.), а также для приема сигналов системного времени ГНСС (UTC).

Встроенный приемник (Д)ГНСС может обеспечивать также автоматический ввод дифференциальных поправок от дифференциальных подсистем, работающих в средневолновом диапазоне.

Дифференциальные поправки могут передаваться базовыми станциями АИС на частотах ОВЧ диапазона в канале АИС.

Ряд навигационных данных может поступать от внешних датчиков или вводиться вручную. Текущие координаты могут быть получены (при внешнем вводе) от судовых приемоиндикаторов ГЛОНАСС, GPS/ГЛОНАСС, наземных радионавигационных систем ЛОРАН-С, ЧАЙКА, комплексированных навигационных систем. Приоритет всегда отдается внешним датчикам и информации, вводимой вручную. Вводимые координаты должны соответствовать геодезической системе координат WGS-84 и привязаны к секундным меткам.

### Режимы работы АИС

АИС обеспечивает работу в трех режимах:

- автономный (autonomous);
- назначенный (assigned);
- запросный (polling).

**Автономный** режим может использоваться во всех морских районах плавания. В этом режиме судами периодически передаются сообщения о местоположении.

Информация о текущем местоположении судов, скорости хода судна, скорости поворота судна, истинном (гироскопическом) и путевом курсе, а также о навигационном статусе судна\* передается периодически с интервалом, зависящим от скорости хода судна, выполнения маневра (изменения курса) и используется для предупреждения столкновений судов. В табл. 1 приведены значения интервалов между передаваемыми сообщениями для различных режимов плавания и на якорной стоянке.

Интервалы между передачами меняются автоматически на основе текущей информации о скорости и курсе судна. Изменение курса при заданной скорости определяется путем сравнения усредненных значений гироскопического курса за 30 с. Если разница превышает  $5^\circ$ , то это свидетельствует об изменении курса.

Используемые в настоящее время радиолокационные САРП решают задачу предупреждения столкновений судов на основе двух показателей: дистанции кратчайшего сближения с целью  $D_{кр}$  и времени кратчайшего сближения с целью  $t_{кр}$ . Оба эти показателя рассчитываются при условии, что скорость цели и курс цели при выполнении маневра расхождения судов не меняются. Это условие зачастую не выполняется и может служить причиной

---

\* Примечание: Навигационный статус судна – место и вид движения судна относительно морской акватории (на ходу, на якорю, не управляется, ограниченная возможность маневрирования, судно стесненное своей осадкой, у причала, на мели, траление рыбы, под парусом).

столкновения судов. Дополнительная текущая информация, получаемая от АИС и отображаемая на экране САРП или на дисплее системы отображения информации с использованием электронной карты, увеличивает надежность предупреждения столкновений. Информация от окружающих судов поступает в радиусе 10-18 морских миль.

Таблица 1

Интервалы передач динамической информации

Режим плавания	Интервал передач динамической информации
Судно на якорной стоянке и на ходу со скоростью не более 3 узлов	3 мин.
Судно на якорной стоянке и на ходу со скоростью более 3 узлов	10 с
Судно на ходу (0 – 14 узлов)	10 с
Судно на ходу (0 – 14 узлов) и переменном курсе	3 1/3 с
Судно на ходу (14 – 23 узла)	6 с
Судно на ходу (14 – 23 узла) и переменном курсе	2 с

**Назначенный режим** работы АИС используется в морских районах А1 ГМССБ, в которых контроль за судами обеспечивается морской администрацией порта, а надежная проводка судов осуществляется с помощью СУДС.

Береговые транспондеры АИС с помощью ретрансляторов обеспечивают в назначенном режиме:

- получение информации, позволяющей идентифицировать суда, устанавливать их тип, текущее местоположение, скорость, навигационный статус и другие данные;
- слежение за наблюдаемыми судами и их сопровождение;
- передачу дифференциальных поправок с целью уменьшения погрешностей получения навигационных данных судов;
- управление работой судовых АИС (установление рабочих частот, временных слотов передачи, периодичности передач, мощности излучения и др.);
- передачу сообщений по безопасности.

Береговая АИС всегда работает в назначенном режиме. Береговая АИС с помощью специального сообщения может автоматически перевести судовой транспондер АИС из автономного режима в назначенный режим. В последнем случае судовые АИС работают по командам береговой станции.

**Режим запроса** (поллинга) используется для запроса береговыми или судовыми станциями АИС навигационных данных судна и вида опасного груза по идентификационному номеру судна, а также данных нескольких судов в определенном географическом районе.

В судовой АИС предусмотрена возможность работы с судовой земной станцией Инмарсат-С и передачи данных с судов, находящихся в любом районе мирового океана, в бассейновый или глобальный центр мониторинга.

Всего во всех режимах работы транспондера используется 22 разных формализованных сообщения, в которых информация передается в определенной последовательности, а число бит для каждого передаваемого параметра ограничено. В числе 22 имеются сообщения по безопасности, в кото-

рых текстовая форма произвольна, однако длина всего сообщения ограничена и не превышает 1008 бит. В табл. 2 приведены данные обо всех 22 сообщениях. Под классом А подразумеваются АИС, устанавливаемые на конвенционные суда (суда, подпадающие под требования Конвенции СОЛАС-74 с учетом Новой Главы V), под классом В – АИС, устанавливаемые на неконвенционные суда и маломерный флот.

Таблица 2

Типы передаваемых сообщений

№ п/п	Наименование сообщения	Основное содержание	Число бит	Режим работы	Станция
1.	Сообщение о местоположении	Спланированное сообщение о местоположении судовой станции, включающее идентификатор судовой станции (MMSI), навигационный статус, признак точности определения местоположения, динамические данные (широта, долгота, истинный курс, путевой курс, скорость относительно грунта, направление и скорость поворота)	168	Автономный	Судовая
2.	Назначенное сообщение о местоположении	Спланированное сообщение о местоположении базовой станции (формат соответствует N 1)	168	Назначенный	Судовая
3.	Специальное сообщение о местоположении	Специальное сообщение о местоположении (формат соответствует N 1)	168	Автономный	Судовая
4.	Сообщение базовой станции	Идентификатор MMSI, местоположение (широта, долгота), UTC данные, вид навигационного датчика	168	Назначенный	Базовая
5.	Статические данные о судне и информация о рейсе	Идентификатор MMSI, индикатор класса станции АИС, номер ИМО, позывной, название судна, тип судна и груза, месторасположение на судне антенны ГНСС, вид навигационного датчика, ETA, осадка, порт назначения	424	Автономный	Судовая
6.	Двоичное избирательное сообщение	Идентификатор MMSI, идентификатор вызываемой станции, данные	Максим 1008	Автономный / назначенный / запросный	Судовая / базовая
7.	Подтверждение двоичного сообщения	Идентификатор подтверждающей станции и порядковый номер сообщения (до 4-х)	72-168	Автономный / назначенный / запросный	Судовая / базовая
8.	Двоичные циркулярные сообщения	Собственный идентификатор, данные (до 952 бит)	Максим 1008	Автономный / назначенный / запросный	Судовая / базовая
9.	Стандартное сообщение о местоположении воздушного судна	Собственный идентификатор, сообщение о местоположении воздушного судна, вовлеченного в поисково-спасательную операцию	168	Автономный / назначенный	Воздушная АИС
10.	UTC запрос	Собственный идентификатор, идентификатор запрашиваемой станции	72	Автономный / назначенный / запросный	Судовая / базовая
11.	UTC ответ	Собственный идентификатор, формат сообщения N 4	168	Автономный / назначенный / запросный	Судовая
12.	Избирательное сообщение, связанное с безопасностью	Собственный идентификатор, идентификатор вызываемой станции, данные (до 936 бит)	Максим 1008	Автономный / назначенный / запросный	Судовая / базовая



№ п/п	Наименование сообщения	Основное содержание	Число бит	Режим работы	Станция
13.	Подтверждение сообщения, связанного с безопасностью	Собственный идентификатор, формат сообщения N 7	Максим 1008	Автономный / назначенный / запросный	Судовая / базовая
14.	Циркулярные сообщения, связанные с безопасностью	Собственный идентификатор, данные	Максим 1008	Автономный / назначенный / запросный	Судовая / базовая
15.	Запросное сообщение	Собственный идентификатор, идентификатор запрашиваемой станции, сдвиг от текущего слота	96 или 144	Автономный / назначенный / запросный	Судовая / базовая
16.	Режим специального назначения	Собственный идентификатор, назначение специального режима передачи сообщений базовой станцией		Назначенный	Базовая
17.	Циркулярная передача поправок (Д)ГНСС	Собственный идентификатор, широта и долгота (Д)ГНСС, данные дифф. поправок (736 бит)	80-816	Назначенный	Базовая
18.	Стандартное сообщение о местоположении станций АИС класса В	Собственный идентификатор, передача сообщений о местоположении (аналогично сообщениям 1, 2, 3) судовыми станциями АИС класса В	168	Автономный / назначенный	Судовая
19.	Расширенное сообщение о местоположении станций АИС класса В	Собственный идентификатор, передача расширенного сообщения о местоположении судовыми станциями АИС класса В ( включает данные о судне и грузе)	312	Автономный / назначенный	Судовая
20.	Сообщение управления линией данных	Собственный идентификатор, информация о зарезервированных слотах	72-160	Назначенный	Базовая
21.	Вспомогательные навигационные сообщения (от СНО и др. источников)	Собственный идентификатор, тип СНО, признак точности, местоположение, вид навигационного датчика	272	Автономный / назначенный / запросный	Мобильная / базовая
22.	Управление каналом	Собственный идентификатор, номера рабочих каналов, режимы приема/передачи, мощность излучения, координаты района обслуживания, индикатор циркулярного/избирательного сообщения, размер переходной пограничной зоны и др.	168	Назначенный	Базовая

### Виды передаваемой информации

Навигационные данные судна, передаваемые в сообщениях, подразделяются на:

- статические;
- динамические;
- рейсовые.

К статическим данным относятся:

- идентификационный номер судна;
- позывной судна;
- длина и ширина судна;
- тип судна;
- расположение антенны приемника (Д)ГНСС.

К динамическим данным относятся:

- координаты судна;
- время (UTC);
- истинный (гирокомпасный) курс судна;
- путевой курс судна;
- навигационный статус судна;
- скорость поворота судна.

К рейсовым данным относятся:

- осадка судна;
- вид груза;
- порт назначения;
- время прибытия;
- контрольные точки маршрута;
- короткие сообщения по безопасности.

В автономном режиме работы АИС статическая и рейсовая информация передаются каждые 6 минут, динамическая – в соответствии с данными табл. 1, сообщения по безопасности – по мере надобности.

Координаты судна: Долгота. Пределы  $\pm 180^\circ$ , дискрет 0,0001 угл. минуты;  
Широта. Пределы  $\pm 90^\circ$ , дискрет 0,0001 угл. минуты.

Следует отметить, что судовые приемоиндикаторы ГНСС индицируют координаты с дискретом 0,0001 угл. минуты, что соответствует величине 1,8 м. К встроенному сенсорному приемоиндикатору требования по точности отображения координат повышаются на порядок. Это объясняется тем, что в АИС предусмотрена возможность дифференциального метода, при котором среднеквадратическая величина погрешности определения координат при геометрическом факторе (HDOP) равном 4 не превышает 10 метров. С учетом возможных перспектив повышения точности в (Д)ГНСС дискрет уменьшен до 0,18 м.

Путевой курс: Пределы 0 – 359,9°, дискрет 0,1°.

Высокая точность представления путевого угла объясняется требуемой точностью проводки судна в узкостях.

Гирокомпасный (истинный) курс: Пределы 0 – 359°, дискрет 1°.

Текущее время: 0 – 59 с, дискрет 1 с.

Скорость поворота судна: Пределы  $\pm 127$  град/мин, дискрет 4,733 град/мин.

Скорость относительно грунта: Пределы 0 – 102,2 узла, дискрет 0,1 узла.

Многоканальность в АИС обеспечивается путем частотного и временного разделения каналов. Радиообмен сообщениями ведется на двух частотных каналах, на каждом частотном канале организована временная селекция 2500 независимых сигналов методом ВРК – временного разделения каналов (в англоязычной литературе принята аббревиатура TDMA – Time Division Multiple Access).

### Формат сигналов

Шкала времени делится на кадры, кадр состоит из 2250 слотов (временных окон). Длительность кадра 60 с, длительность слота – 26,67 мс (см. рис. 2). Информация передается методом двоичного кодирования со скоростью 9600 бит/с., длительность бита – 104 мкс.

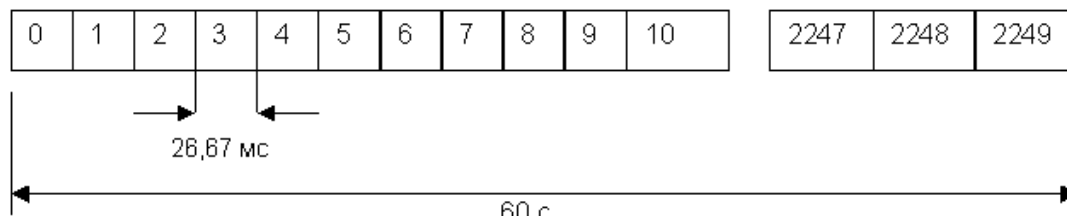


Рис. 2. Формат кадра

Двоичное кодирование импульсов формируется методом GMSK (GMSK/FM – Gauss Minimum Shift Keying). Индекс модуляции выбирается равным 0,5 при частотном разное между каналами 25 кГц и 0,25 при частотном разное 12,5 кГц.

GMSK–модулятор обеспечивает при передаче цифровой информации непрерывное изменение частоты (или фазы) сигнала без скачков частоты (фазы).

Этот метод модуляции позволяет примерно в 2 раза уменьшить полосу занимаемых частот по сравнению с широко используемыми методами фазовой манипуляции со скачкообразным изменением фазы от 0 до  $\pi$  или скачкообразным изменением частоты от  $f_1$  до  $f_2$ .

При GMSK модуляции, если все передаваемые биты равны 0 (или все равны 1), фаза сигнала меняется по закону:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + (\pi t/2T),$$

где:  $\varphi_0$  - начальная фаза;

$T$  – длительность бита.

Если  $t = nT$ , где  $n$  – целое число, то фаза высокой частоты в моменты стробирования каждого последующего и предыдущего бита отличается на  $\pi/2$ .

Такое изменение фазы имеет сигнал с частотой  $f_1 = \frac{\omega_0}{2\pi} + \frac{1}{4T}$ , где  $\omega_0$  - круговая опорная частота стробирования. Напротив, если цифровая последовательность имеет вид: 0;1;0;1;0;1..., то

$$\varphi(t) = \varphi_0 - (\pi t/2T),$$

а сигнал с таким изменением фазы имеет частоту

$$f_2 = \frac{\omega_0}{2\pi} - \frac{1}{4T}.$$

Временная синхронизация формируемых кадров и слотов обеспечивается в АИС в автономном режиме по сигналам ГНСС, в назначенном режиме

– по сигналам базовой станции. Максимальная погрешность синхронизации  $\pm 312$  мкс ( $\pm 3$  бита). Синхронизация возможна при приеме сигналов хотя бы одного спутника ГНСС (при известных координатах судна). На рис. 3 приведен формат слота.



Рис. 3. Формат слота

В начале слота передается преамбула, представляющая собой последовательность из 24 бит вида 0101... Преамбула обеспечивает побитовую синхронизацию стробирующих импульсов.

Стартовые и конечные флаги содержат по 8 бит и характеризуют начало и конец информационной последовательности, содержащей передаваемые данные.

16 избыточных бит обеспечивают обнаружение и коррекцию информационных бит, принятых с ошибками.

Буфер – свободное временное поле, формируемое с целью компенсации погрешностей из-за неточности временной привязки к сигналам ГНСС и из-за задержки при распространении радиоволн от пункта передачи до пункта приема. Емкость буфера – 24 бита.

Информационные данные в слоте содержат 168 бит.

Общее число бит в слоте – 256.

Из 22-х передаваемых АИС сообщений более половины содержат число информационных бит не более 168 и, следовательно, занимают лишь один слот. Продолжительность этих сообщений – 26,67 мс.

Максимальная длительность сообщения составляет 1008 бит. Такие сообщения занимают 5 соседних слотов, так как преамбула и флаги начала и конца передаются при длительных сообщениях лишь по одному разу: в начале и в конце сообщения.

### Организация выбора слотов передачи при ВРК

Для обеспечения контролируемого доступа к каналу в зависимости от типа передаваемой информации и режима работы используются четыре различные схемы организации ВРК (TDMA): самоорганизующаяся (SOTDMA -

Self Organized Time Division Multiple Access), с приращением (ITDMA - Incremental Time Division Multiple Access), случайная (RATDMA - Random Access Time Division Multiple Access) и фиксированная (FATDMA - Fixed Access Time Division Multiple Access).

SOTDMA является основной схемой доступа и используется судовой станцией АИС для организации повторяемых передач (сообщений о местоположении) в автономном режиме. В случаях когда требуется изменение интенсивности передач или передача сообщений неповторяемого характера, могут использоваться другие схемы доступа.

После включения судовой АИС производит прием сигналов на обоих частотных каналах и в течение минуты просматривает один кадр для определения свободных, занятых и зарезервированных слотов, идентификации и местоположения других станций АИС. В течение минуты устанавливается динамическое состояние всех пользователей и формируется карта кадра, отражающая его загрузку.

После этого судовой АИС выходит на эксплуатационный режим и начинает располагать слоты в соответствии с собственной программой (определяется режимом работы, режимом плавания и типом передаваемых сообщений) по следующему алгоритму.

Судовая АИС выбирает первый слот для передачи – номинальный слот передачи (NTS – Nominal Slot Selective). Для этого по схеме доступа RATDMA в некотором интервале выбора (SI – Selective Interval) среди кандидатных (доступных) слотов произвольно выбирается номинальный стартовый слот (NSS – Nominal Start Slot). Максимальная величина SI равна 150 слотам (что эквивалентно 4 с), минимальная составляет четыре слота. Слот NSS в первом кадре является контрольным при выборе номинального слота NS (Nominal Slot). Номинальный слот NS используется как центральный, вокруг которого выбираются слоты для передачи сообщений о позиции. Для первой передачи значения NSS и NS совпадают. Любое значение NS может быть определено в соответствии с соотношением:  $NS = NSS + (n \times NI)$ , где  $0 \leq n < RR$ , где RR – интенсивность передач (Reporting rate), то есть число передач за время одного кадра. Если интенсивность передач RR, то при числе слотов в кадре SL = 2250, величина номинального приращения NI = 2250/RR.

Перед передачей первого кадра станция АИС в зависимости от требуемой интенсивности передач RR вычисляет с использованием схемы доступа ITDMA и устанавливает величину сдвига слота (NI – Nominal Increment), то есть величину промежутка в числе слотов от текущего номинального слота NS до следующего предполагаемого слота NS. Эта величина, а также флаг сохранения включаются в коммуникационный статус ITDMA, позволяющий определить временное положение следующего слота, используемого для передачи. Флаг сохранения имеет два состояния: «1» или «0». Если выбранный слот NSS сохраняется в следующем кадре, то флаг сохранения имеет состояние «1», если не сохраняется, то состояние флага «0». Таким образом, информация о коммуникационном статусе может использоваться принимающей станцией АИС для размещения своих слотов.

Распределение слотов в кадре с использованием SOTDMA приведено на рис. 4.

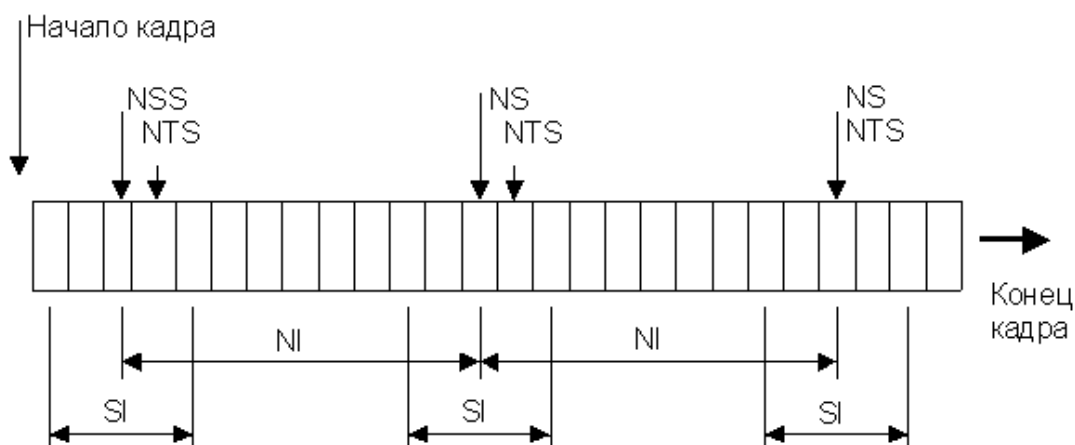


Рис. 4. Распределение слотов в кадре с использованием SOTDMA

NI - номинальное приращение; NS - номинальный слот; NSS - номинальный стартовый слот; NTS - номинальный слот передачи; SI - интервал выбора.

Время ожидания – число кадров в которых будут размещаться слоты. Время ожидания выбирается в интервале от 3 до 8 и соответствует интервалу времени от 3 до 8 минут. Выбранное значение также является частью коммуникационного статуса. После передачи очередного слота NTS время ожидания уменьшается на единицу. Когда оно становится равным нулю, выбирается новый NTS. При этом определяется и проверяется на наличие доступных слотов интервал выбора SI, заново рассчитывается величина сдвига и устанавливается значение времени ожидания. Эти величины включаются в коммуникационный статус и передаются в поле данных слота.

Таким образом, обеспечивается равномерное динамическое распределение слотов в каналах, что облегчает вновь входящим транспондерам АИС возможность произвольно располагать слоты в кадре.

В автономном режиме для передачи сообщений намеренно вводится случайный выбор номинальных излучающих слотов NTS, которые выбираются внутри интервала выбора SI (величина интервала выбора выбирается из соотношения  $SI = 0,2 NI$ ).

Сообщения не излучаются во время NSS и NS. При периодическом излучении передаваемые сообщения могли бы быть подвержены взаимным помехам от других станций. В самом деле, если был бы выбран номинальный селективный слот NSS, который был бы занят другой станцией, и интенсивности передач в минуту  $n$  были бы одинаковыми, то из-за взаимных помех работа системы была бы невозможна, так как слоты перекрывались бы двумя передачами.

При случайном выборе номинальных излучающих слотов вероятность перекрытия слотов двумя станциями уменьшается.

В работе [5] приведено аналитическое выражение для расчета вероятности  $P(n)$  совпадения  $n$  слотов двух станций, когда станции выбирают одинаковые значения NSS и NT:

$$P(n) = \frac{1}{(SL - SI)(SI)^n}.$$

Если  $n = 12$ ,  $SL = 2250$ , то  $NI = \frac{2250}{12} = 187,5$ ;

$SI = 0,2 NI = 37,5$ .

Результаты расчета сведены в табл. 3.

Таблица 3

Вероятности совпадения  $n$  слотов двух станций

$n$	$P(n)$
1	$1,21 \times 10^{-5}$
2	$3,21 \times 10^{-7}$
3	$8,57 \times 10^{-9}$
4	$2,29 \times 10^{-10}$

Если в рассматриваемом случае при регулярной передаче вероятность совпадения слотов  $P(n)$  была бы равна 1, то при использовании алгоритма SOTDMA эта вероятность уменьшается во много раз.

В назначенном режиме (схема доступа FADMA) базовая станция использует конкретные номера слотов относительно номера стартового слота. Номер назначенного слота указывается в сообщении. В сообщении указывается также фиксированный сдвиг относительно текущего слота и время ожидания.

### Зона покрытия АИС

Радиус покрытия АИС определяется, исходя из выполнения двух условий:

- принимающая станция должна находиться в пределах ограниченной дальности распространения радиоволн над земной поверхностью от передающей станции;
- мощность излучения передающей станции должна обеспечивать необходимую минимальную мощность сигнала на входе приемника принимающей станции.

Предельная дальность распространения радиоволн  $R$  ( без учета рефракции) определяется выражением:

$$R \text{ (км)} = 3,6 (\sqrt{h_1} \text{ (м)} + \sqrt{h_2} \text{ (м)}),$$

где  $h_1, h_2$  - высоты расположения передающей и приемной антенн.

Расчетное выражение для напряженности поля в месте приема:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \frac{\lambda^2}{(2\pi)^2 R^2},$$

где  $P_R$  - излучаемая мощность передатчика (Вт);

$P_T$  - необходимая минимальная мощность сигнала на входе приемника (Вт);

$R$  - дальность действия (м);

$\lambda$  - длина волны (м);

$G_T, G_R$  - соответственно, коэффициенты усиления передающей и приемной антенн.

Если  $G_T = G_R = G$ ;  $\lambda = 2$  м (для используемого диапазона частот в АИС), то расчетное выражение упрощается и принимает вид:

$$R = \sqrt{\frac{P_T G^2}{P_R 4\pi^2}} .$$

Полученное выражение позволяет рассчитать дальность действия для свободного пространства. С учетом особенностей распространения радиоволн над морской поверхностью в работе [6] приводятся графики (рис. 5), позволяющие повысить точность расчета дальности.

На графике приведены значения напряженности поля  $E_{np}$  (дБмкВ/м), полученные на разных удалениях  $R$  (статутные мили) при излучаемой мощности  $P_R = 1$  кВт. Напомним, что 1 статутная миля равна 1,609 км.

Значения напряженностей поля приведены для свободного пространства, а также для разных высот установки передаваемых антенн (1440; 960; 480; 240; 120; 60; 30 м) и высоте установки приемной антенны 9 м при распространении радиоволн над морской поверхностью.

Радиус действия, определяющий зону покрытия АИС, зависит от излучаемой мощности передатчиков  $P_R$ , чувствительности приемников  $E_{np} = \sqrt{P_T}$ , потерь в антенном фидере  $K_{фид}$ , коэффициента усиления антенны  $G$ , коэффициента увеличения напряженности поля в месте приема из-за расположения антенны над морской поверхностью  $K_m$ .

Номинальные значения параметров, принимаемые при расчете, следующие:

$$P_R = 12,5 \text{ Вт (+41 дБмВт)}; K_{фид} = 0,8 \text{ (-2дБ)}; G = 2 \text{ (6дБ)};$$

$$E_{np} = 4,5 \text{ мкВ (-107 дБмВ)}; K_m = 4 \text{ (12 дБВ)}.$$

Расчеты показывают, что с учетом приведенных номинальных значений параметров при расположении судовой антенны на высоте 9 м, а береговой ретрансляционной антенны на высоте 100 м, дальность действия АИС будет 45 морских миль. Для случая межсудовой связи, когда судовые приемопередающие антенны расположены на высоте 9 м, дальность действия АИС равна 18 морским милям.



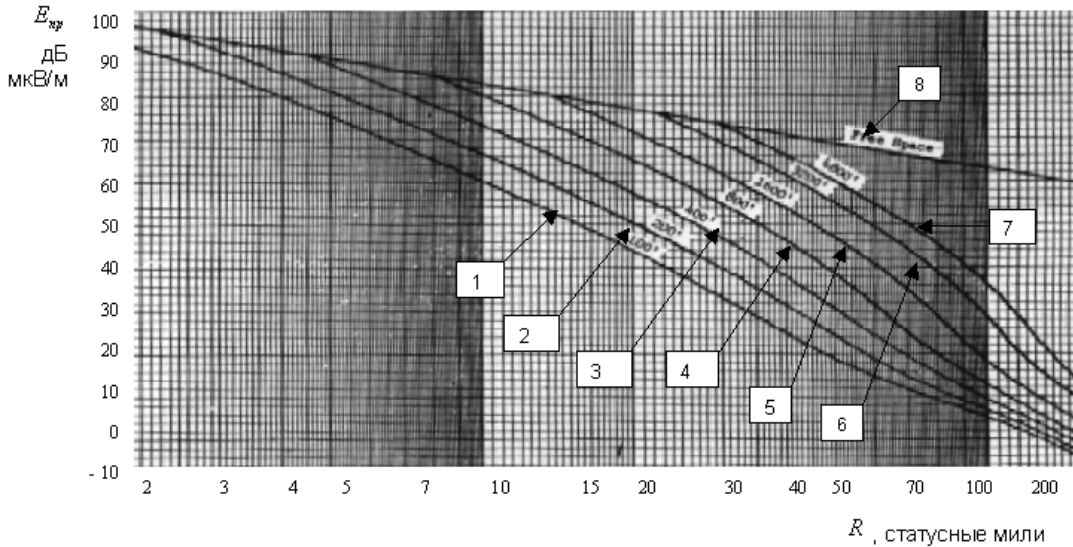


Рис. 5. Напряженность поля над морской поверхностью на разных удалениях при излучаемой мощности 1 кВт

Обозначения кривых на рис. 5 (для высоты установки антенны береговой АИС):

- 1 – 30 м;
- 2 – 60 м;
- 3 – 120 м;
- 4 – 250 м;
- 5 – 500 м;
- 6 – 1000 м;
- 7 – 1500 м;
- 8 – свободное пространство.

Если излучаемая мощность будет уменьшена до 2 Вт, а все остальные параметры останутся прежними, то межсудовая связь будет на расстоянии 13 морских миль.

Если чувствительность приемника будет заглублена и составит 9 мкВ, а все остальные параметры останутся номинальными, то дальность межсудовой связи будет составит 14 морских миль. Если в последнем случае излучаемая мощность передатчика будет уменьшена до 2 Вт, то межсудовая связь будет осуществляться на расстоянии 10 морских миль.

Таким образом, при наихудших условиях работы передатчика и приемника межсудовая связь АИС гарантируется в радиусе 10 морских миль.

### Система отображения информации АИС

На судах отображение информации АИС производится на дисплеях РЛС и САРП, на которых отображается окружающая обстановка и предусмотрены средства проигрывания маневра для предупреждения столкновения судов. Вид отображаемой информации отличается для радиолокационного САРП и для АИС, что позволяет идентифицировать вид средства, исполь-

зуюемого для отображения цели (РЛС или АИС). Символика отображаемой информации АИС приведена в табл. 4.

Таблица 4

Символы АИС

АИС – цель	Значение	Символ
Пассивная цель	Символ цели указывает наличие судна, оборудованного АИС, в определенном месте. Острый угол символа ориентирован по гирокомпасному курсу. Никакая дополнительная информация не предоставляется до активизации цели. Символ включается для уменьшения нагрузки экрана.	
Активная цель	Символ цели показывает: — вектор (скорость и курс относительно грунта); — гирокомпасный курс (пунктир); — факт поворота цели и его направление	
Выбранная цель	Все принятые данные о цели, а также вычисленные значения Дкр и Ткр отображаются в окне буквенно-цифровой информации	
Опасная цель	Если в результате обработки устанавливается, что для заданных Дкр и Ткр цель (активная или пассивная) оказывается опасной, то она отображается символом "опасная цель" и включается сигнал тревоги	
Потерянная цель	Если сигнал любой цели не принимается ближе, чем заданная дистанция, то в последнем месте его наблюдения отображается символ "потерянная цель" и включается сигнал тревоги	
Цель без данных о гирокомпасном курсе	Если информация о гирокомпасном курсе не включается в передаваемое сообщение, то острый угол символа ориентирован по курсу относительно грунта	
Активная цель без данных о гирокомпасном курсе	Символ цели без данных о гирокомпасном курсе содержит вектор, указывающий курс и скорость относительно грунта	
Цель, данные которой получены от СУДС	Информация поступает от СУДС, данные о цели получены с помощью радара	
Активная цель, данные которой получены от СУДС	Отображается вектор перемещения судна (путь и скорость относительно грунта), полученный с помощью радара СУДС	

Приведенные символы позволяют получить на экране дисплея размеры судна, ориентацию диаметральной оси судна, вектор движения судна, направление изменения курса судна (по часовой стрелке или против), что обеспечивает судоводителя дополнительной информацией для выбора правильного решения по маневру.

### Заключение

В период с 2002 по 2008 г. на судах будут установлены десятки тысяч судовых транспондеров АИС и сотни береговых транспондеров. Крупнейшие фирмы мира будут заняты разработкой и производством АИС, используя накопленный опыт разработки ОВЧ радиостановок и радионавигационных

приемоиндикаторов (Д)ГНСС. Представленный материал позволит сократить время на изучение радионавигационного оборудования АИС.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Черняев Р.Н., Зурабов Ю. Г. Особенности внедрения и применения автоматической информационной (идентификационной) системы АИС. Мортехинформреклама, 2000, № 9(376). – С. 1-38.
2. Technical characteristics for a universal shipborne automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band // Draft Revision of Recommendation ITU-R. - V.1371. – September, 2000. – 118 p.
3. Recommendation on performance standards for an universal shipborne automatic identification system (AIS) // Annex 3 of Resolution MSC.74(69) «Adoption of new and amended performance standards», May 13, 1998. – P. 42-54.
4. Ingo Harre. An improved transmission scheme for automatic identification system (AIS) using the broadcast principle // Ortung und navigation. – 1997. - N2. – P. 198-205.
5. Capacity and Throughput using a self Organized time division multiple access VHF data link in surveillance applications/ Master thesis, [GP@C](#) Sweden AB, April 1998. – P. 56.
6. Gary Patrick. Frequency provisions for the shipborne automatic identification system (AIS) // NTIA/USCG, May 1999.

---

## СПУТНИКОВЫЕ И НАЗЕМНЫЕ РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

---

ГРНТИ 47.49.31

### **ОСТАНОВ ПОИСКА И ЗАХВАТ РАДИОСИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ НА СОПРОВОЖДЕНИЕ В ПРИЕМНИКЕ - СОГЛАСОВАННОМ ФИЛЬТРЕ ПО КРИТЕРИЮ ВАЛЬДА**

**Ю. С. ДУБИНКО**  
(КБ «НАВИС»)

*Все существующие приемники спутниковой навигации по принципу формирования взаимно-корреляционной функции являются корреляционными. Для них характерен длительный цикл поиска сигнала выбранного спутника ( $\approx 20$  секунд). Приемники в виде согласованного фильтра, реализация которых становится возможной с появлением сигнальных процессоров очень высокого быстродействия, позволяют сократить этот цикл до 1 ms, что существенно повышает помехоустойчивость этого режима за счет эффекта накопления вероятности правильного обнаружения за заданное время. Дополнительным улучшением помехоустойчивости поиска (сокращением среднего числа циклов) обладает двухпороговая процедура обнаружения по критерию Вальда. В статье приводятся теоретические оценки улучшения характеристики поиска в НАП СНС.*

Стандартные процедуры обнаружения сигнала в шумах сводятся к задаче проверки простой гипотезы  $H_s$  о наличии полезного сигнала в принимаемой аддитивной смеси его с шумами против простой альтернативы  $H_0$  (о его отсутствии).

Процедура сводится к априорному разбиению выборочного пространства [1] на две области, соответствующие проверяемым гипотезам. В задаче обнаружения сигнала это гипотеза о наличии ненулевого математического ожидания в элементах выборки  $m$ , связанного с амплитудой полезного сигнала. Если тестовая статистика попадает в область принятия гипотезы, принимается решение о наличии сигнала, при попадании ее в область альтернативы – об его отсутствии. Как корреляционный, так и фильтрационный приёмники спутниковых навигационных сигналов при поиске формируют оценку амплитуды принимаемого сигнала в виде усреднённого значения ординат взаимнокорреляционной функции (ВКФ) – свёртки входной смеси с репликой кода на интервале его эпохи (1мс). Разница заключается в том, что эта величина в корреляционном приёмнике формируется последовательным во времени накоплением (усреднением) произведений отсчётов входной смеси на знак ожидаемого символа дальномерного кода, а в согласованном фильтре – параллельным по множеству этих произведений.

Важно то, что в любом случае с темпом 1мс формируется случайная величина  $x$ , которая представляет собой оценку амплитуды принимаемого сигнала. Математическое ожидание этой величины обозначим через  $m$ . Тогда функции правдоподобия (в нашем случае одномерные), соответствующие проверяемым гипотезам на интервале 1мс, можно записать в следующем виде.

$$\text{Отсутствие сигнала: } L(o/x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (1)$$

$$\text{Наличие сигнала: } L(s/x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (2)$$

Напомним, что оптимальным является шаг (окно) поиска шириной в половину длительности кодового чипа (периода тактовой частоты кода). Число 2 является единственным целым числом, при котором разбиение длительности кодового чипа на целое число шагов поиска обеспечивает некоторый выигрыш в отношении сигнал/шум при поиске. Проиллюстрируем это положение численными примерами.

На рис. 1 показана треугольная фигура нормированного на максимальное значение интеграла свёртки двух прямоугольников одинаковой ширины (кодового чипа и окна поиска) в зависимости от начального (случайного) несовпадения их фронтов  $\varepsilon$ . При случайном совпадении заднего фронта окна с передним фронтом ожидаемого чипа в следующем такте поиска сформируется величина, пропорциональная максимально возможной площади перекрытия этих прямоугольников. На рис. 1 этот максимум обозначен величиной 1. Знаком  $\otimes$  обозначены нормированные ординаты интеграла свёртки на  $i-1$  и  $i$ -том шагах поиска (при  $\varepsilon \neq 0$ ). Эти ординаты пропорциональны площади взаимного перекрытия кодового чипа и окна поиска (вертикальная штриховка для  $i-1$  шага и горизонтальная для  $i$ -го).

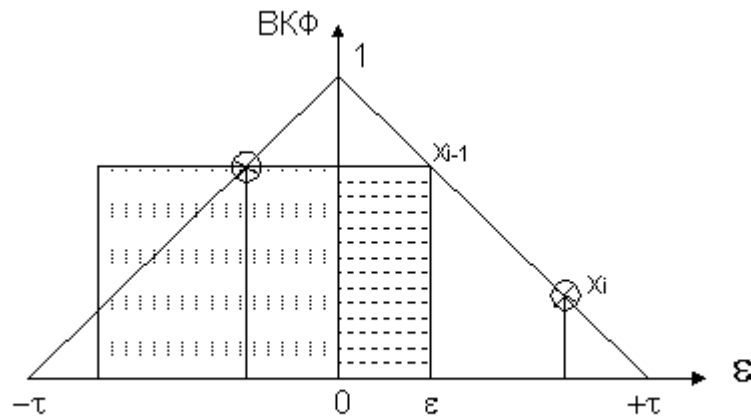


Рис. 1. Поиск при ширине окна, равном длительности кодового чипа

В этом окне величина  $x$  для применения в формулах (1) и (2) формируется как

$$x = x_{i-1} + x_i, \quad (3)$$

причем 
$$M\{x\} = \left[ \left(1 - \frac{\varepsilon}{\tau}\right) + \frac{\varepsilon}{\tau} \right] m_x = m_x.$$

Другими словами, с порогом (порогами) обнаружения в этом случае сравнивается текущая сумма соседних по времени (с интервалом  $\tau$ ) выходных величин согласованного фильтра.

Для тех же условий, что и на рис. 1, интеграл свёртки (оценка ВКФ) кодового чипа с окном шириной  $\tau/n$  будет выглядеть как трапеция с шириной основания  $\tau(1+2/n)$  и высотой  $1/n$ .

Для  $n = 2$  на рис. 2 приведён график математического ожидания взаимокорреляционной функции (МО ВКФ).

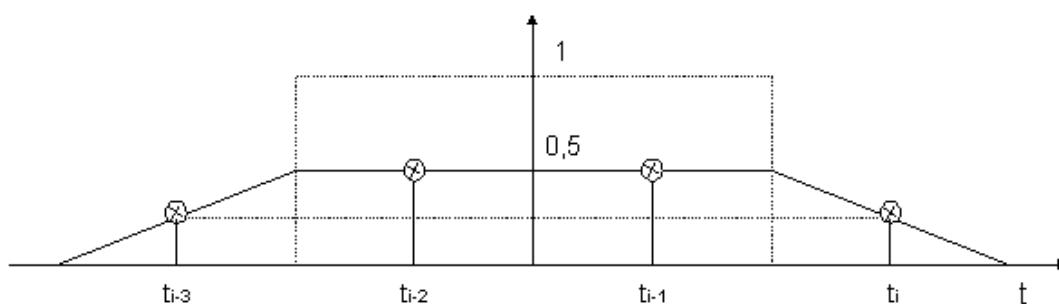


Рис. 2. МО ВКФ при  $n=2$

Здесь:  $x = x_{i-3} + x_{i-2} + x_{i-1} + x_i, \quad (4)$

причем  $M[x] = (0,25 + 0,5 + 0,5 + 0,25) m_x = 1,5 m_x.$

В связи с тем, что ширина полосы пропускания сквозного радиотракта  $\Delta f_c$  (для реализации узкостробового корректора) должна выбираться из соотношения

$$\Delta f_c \gg F_T, \quad (5)$$

где  $F_T$  - тактовая частота кода, отсчёты ординат ВКФ при сужении окна поиска в  $n$  раз (реализации их шумовых компонент) можно считать независимыми (при конечных  $n$ ).

Тогда для  $x$  (при  $n = 1$ ) в соответствии с (3) дисперсия составит

$$\sigma_{x(1)}^2 = 2\sigma^2 \quad (6)$$

$$\sigma_{x(1)} = \sqrt{2}\sigma.$$

Отношение сигнал/шум  $q$  (по напряжению):

$$q_{(1)} = \frac{m_x}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

При  $n = 2$  дисперсия в соответствии с (4) будет

$$\begin{aligned} \sigma_{x(2)}^2 &= 4\sigma^2 \\ \sigma_{x(2)} &= 2\sigma, \end{aligned} \quad (8)$$

а отношение сигнал/шум:

$$q_{(2)} = \frac{1,5m_x}{2} = \frac{1,5}{\sqrt{2}} q_{(1)} \approx 1,061 q_{(1)}. \quad (9)$$

То же МО ВКФ для  $n = 3$  приведено на рис. 3.

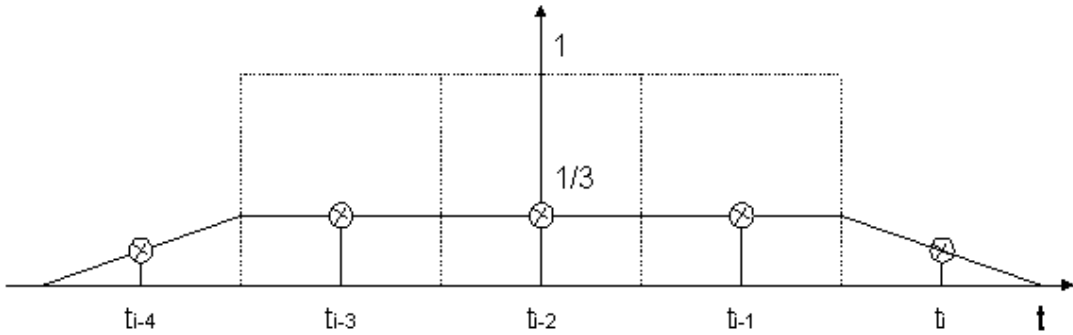


Рис. 3. МО ВКФ при  $n=3$

В этом случае

$$\begin{aligned} x_{(3)} &= \sum_{k=0}^4 x_{i-k} \\ m_{x(3)} &= \frac{4}{3} m_x, \end{aligned} \quad (10)$$

а дисперсия и СКО, соответственно,

$$\begin{aligned} \sigma_{x(3)}^2 &= 5\sigma^2 \\ \sigma_{x(3)} &= \sqrt{5}\sigma. \end{aligned} \quad (11)$$

Отношение сигнал/шум (по напряжению) в этом случае составит:

$$q_{(3)} = \frac{4}{3\sqrt{5}} = \frac{4\sqrt{2}}{3\sqrt{5}} q_{(1)} \approx 0,84 q_{(1)}. \quad (12)$$

Выигрыш в отношении сигнал/шум с окном поиска шириной в  $1/n$  длительности кодового чипа (по сравнению с  $n = 1$ ) можно записать как

$$\bar{q}(n) \approx \frac{(1 + \frac{1}{n})\sqrt{2}}{\sqrt{n+2}}. \quad (13)$$

Эта формула справедлива для  $n$ , не превышающих отношения ширины полосы сквозного радиотракта к тактовой частоте дальномерного кода.

Значения функции целочисленного аргумента (13) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость отношения сигнал/шум (по напряжению) от целочисленного отношения длины кодового чипа к ширине окна поиска

n	1	2	3	4	5	6	7
q(n)	1,00	1,06	0,84	0,72	0,64	0,58	0,54

Возвращаясь к задаче проверки статистических гипотез, заметим, что функции правдоподобия (1) и (2) записаны в предположении гауссова аддитивного шума с нулевым математическим ожиданием. Это строго справедливо для преобладающих в канале тепловых шумов и достаточно хорошо согласуется с моделью псевдошумовых сигналов, в которые превращает любые помехи приёмник сигналов навигационных спутников, перемножая их на ожидаемый код и усредняя на интервале 1 мс. Эти функции показаны на графиках рис. 4.

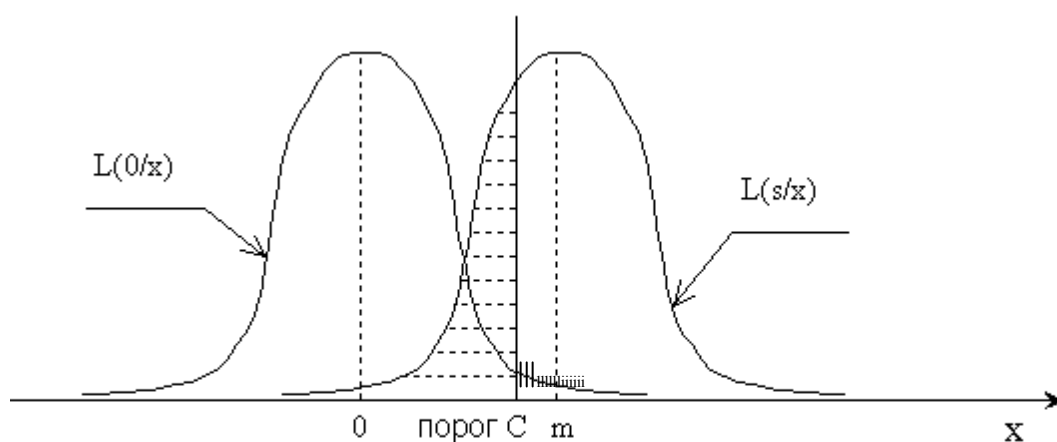


Рис. 4. Функции правдоподобия при обнаружении сигнала в шумах

На этом рисунке обозначен порог  $C$  принятия решения о наличии сигнала по правилу:

- $x \geq C$  - сигнал присутствует,
- $x < C$  - сигнала нет,

а заштрихованные области справа (вертикальная штриховка) и слева (горизонтальная) от порога определяют вероятности ошибочных решений – ложной тревоги с вероятностью  $P_{лт}$  и пропуска сигнала с вероятностью  $P_{пр} = 1 - P_{по}$  соответственно. (Здесь  $P_{по}$  – вероятность правильного обнаружения присутствующего сигнала).

Величина порога  $C$  определяется принятым критерием оптимальности.

Процедура обнаружения сигнала по критерию максимального правдоподобия ( $C = m/2$ ) и двухпороговая (последовательная) процедура по критерию Вальда графически представлены на рис. 5.

Недостатком всех однопороговых процедур проверки статистических гипотез является жёсткая функциональная связь вероятностей ошибочных ре-



шений: уменьшение вероятности ложной тревоги  $P_{лт}$  (сдвигом порога  $C$  вправо) неизбежно приводит к возрастанию величины вероятности пропуска сигнала  $P_{пр}$  (и наоборот). Часто (если это физически возможно) для обеспечения заданных малых величин  $P_{лт}$  и  $P_{пр}$  приходится заранее накапливать несколько элементов выборки. В нашем случае потребуется несколько миллисекундных циклов для принятия правильных решений с заданной вероятностью.

Так, например, в аппаратных цифровых приёмниках ряда «Бриз» поиск сигнала по задержке кода осуществляется непрерывным сдвигом фазы его реплики за счёт фиксированного сдвига тактовой частоты ожидаемого кода. Этот частотный сдвиг обеспечивает необходимый уровень накопления (усреднения) входного сигнала для обнаружения его с заданными вероятностями ошибок (при этом цикл поиска возрастает и в приемниках ряда «Бриз» составляет  $\approx 20$  секунд). Минимизацию среднего числа циклов (времени) поиска при фиксированных  $P_{лт}$  и  $P_{по}$  может обеспечить двухпороговая процедура по критерию Вальда, минимизирующая стоимость (продолжительность) эксперимента.

В соответствии с этим критерием назначаются два порога – нижний  $C_n$  и верхний  $C_b$  (см. рис. 5) и при  $x \leq C_n$  принимается решение об отсутствии сигнала, при  $x \geq C_b$  – о его наличии, а если  $C_n < x < C_b$ , то принимается решение о продолжении эксперимента.

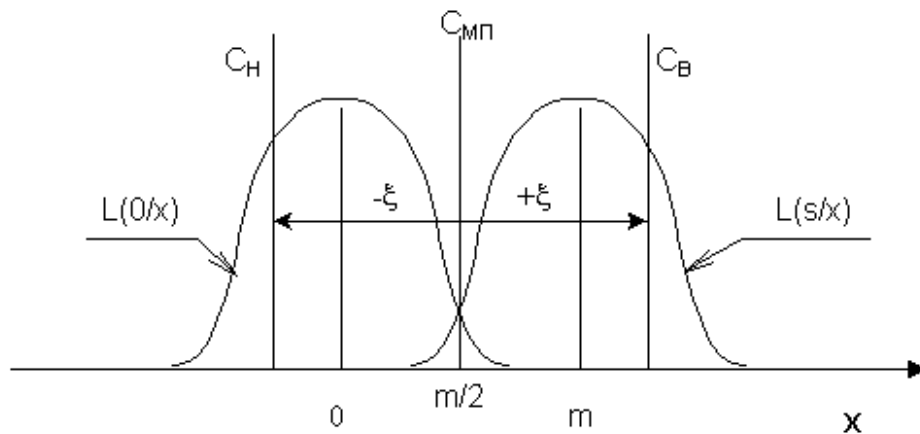


Рис. 5. Пороги обнаружения сигнала в шумах по критериям максимального правдоподобия ( $C_{МП}$ ) и Вальда ( $C_n, C_b$ )

В силу симметрии функций правдоподобия (1), (2) относительно оси  $C = m/2$  нижний и верхний пороги целесообразно также сформировать симметрично этой оси, т.е.

$$\begin{aligned}
 C_n &= \frac{m}{2} - \xi \\
 C_b &= \frac{m}{2} + \xi
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

При этом вероятности ошибочных решений  $P_{лт}$  и  $P_{пр}$  равны между собой и могут быть независимо друг от друга уменьшены соответствующим выбором нижнего и верхнего порогов.

Пороги в соответствии с (15) удобны тем, что эффективность последовательной процедуры зависит только от одного параметра  $\xi$ .

Симметрия  $C_n$  и  $C_b$  относительно порога максимального правдоподобия удобна для дальнейших оценок, но не обязательна. Заметим, что в случае проверки гипотез о математическом ожидании случайной величины (обнаружение сигнала в аддитивном шуме) критерий максимального правдоподобия обеспечивает одинаковые вероятности ошибочных решений (ложной тревоги и пропуска сигнала). Заметим также, что применение в этом случае последовательного анализа по критерию Вальда обеспечивает минимально возможный выигрыш во времени поиска. Если одна из этих вероятностей существенно превосходит другую, выигрыш критерия Вальда заметно возрастает [1].

В связи с тем что в задачах спутниковой навигации никаких серьёзных доводов в пользу несимметричного варианта нет, ограничимся симметричным случаем (15), считая выигрыш при этом минимально гарантированным.

Выберем достаточно высокие вероятности правильных решений  $P_{по}=1 - P_{лт} = 0,999$ . Этот выбор предписывает установить верхний порог  $C_b=3,09\sigma$  (аргумент функции Лапласа  $z$

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (16)$$

для значения  $\Phi(z) = 0,999$ ).

Для нормальных условий приёма спутниковых сигналов (стандартная чувствительность приёмника при отсутствии преднамеренных помех) отношение сигнал/шум (по напряжению)  $q = m/\sigma \approx 3$  при интервале накопления в 1мс. Для этих же условий нижний порог  $C_n = -0,09\sigma$ .

В реальных условиях (особенно при наличии помех) это отношение может упасть до  $q = 1,5$  и ниже. Важно то, что величина  $q$  сильно зависит от условий приёма и в каждом акте поиска случайна. Это означает, что в реальных условиях необходима адаптация процедуры поиска к величине СКО входного сигнала путём оценивания текущего значения  $\sigma$  и формирования порогов, пропорциональных этой оценке:

$$C_b = 3,09 \sigma, \quad C_n = -0,09 \sigma.$$

Эти пороги указаны для вероятностей правильных решений  $P_{пн} = P_{по} = 0,999$ . Для других значений этой вероятности величины порогов легко рассчитываются с помощью (16).

Если  $q < m$ , то и расстояние между гипотезами  $m = q$  также уменьшается. Для повышения этих величин необходимо осуществлять предварительное накопление отсчётов входного сигнала в любой однопороговой процедуре проверки статистических гипотез. При этом уменьшение отношения сигнал/шум  $q=m/\sigma$  можно трактовать как уменьшение амплитуды полезного сиг-

нала  $m$  (аномальные потери энергии на трассе распространения, включая частичное затенение, например, кронами деревьев), так и за счёт аномально-го возрастания шумов (главным образом из-за помех).

Строго говоря, из аналоговой части ПРМ с некогерентным выделением огибающей поступают существенно положительные величины – оценки модуля амплитуды сильно зашумлённого сигнала. Действующая на входе приёмника смесь сигнала с шумом представляет собой векторную сумму  $\bar{x} = \bar{s} + \bar{n}$ .

Обозначив угол между этими векторами через  $\psi$ , можно записать для условной плотности вероятности случайной величины  $x$  следующее выражение:

$$\varphi(x/\psi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(x - s\cos\psi)^2\right\}. \quad (17)$$

Такая же плотность вероятности описывает и вторую проекцию вектора  $x$

$$\varphi(y/\psi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(y - s\sin\psi)^2\right\}. \quad (18)$$

Поскольку  $\psi$  равновероятно распределён в пределах  $0 - 2\pi$ , для безусловных плотностей вероятностей проекций можно записать

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varphi(x/\psi) d\psi, \\ \varphi(y) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varphi(y/\psi) d\psi. \end{aligned} \quad (19)$$

К сожалению, эти интегралы в элементарных функциях не выражаются. Но этого и не требуется, поскольку отсчёты квадратурных составляющих смеси сигнала  $s$  с шумом  $n$ , взятые в моменты фронтов квазимеридиана бинарно квантованных (моменты перехода через нуль) ортогональных им компонент, образуют независимые последовательности нормальных случайных величин, очень близких к амплитудам этих квадратур.

Отличие этих отсчётов от амплитуд – это разница между длинами катета АВ и гипотенузы ОВ треугольника ОАВ на рис. 6а. Оно оценивается относительной погрешностью  $\delta \leq \varepsilon^2/2$ , где через  $\varepsilon/2$  обозначен угол ОВА, синус которого равен входному отношению сигнал/шум нормальной случайной величины  $x$

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_0^2}} \quad (20)$$

$$\sin \frac{\varepsilon}{2} \approx \frac{\varepsilon}{2} = \frac{s}{\sigma_0} = q_0. \quad (21)$$

Если  $\sigma_0$  – СКО нормальных тепловых шумов, то (21) определяет оценку сигнал/шум по напряжению сверху (без учёта влияния помех). Обычно уровень тепловых шумов задают через спектральную плотность мощности шумов (отношение сигнал/шум по мощности в полосе частот шума 1Гц –Q).

Значения  $q_0$  для различных значений ширины полосы сквозного радиотракта и набора типовых значений Q приведены в табл. 2.

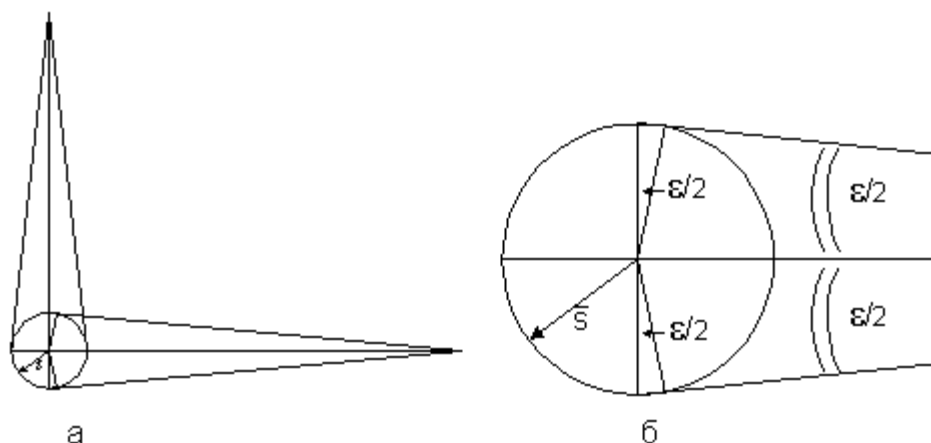


Рис. 6. Векторные диаграммы мгновенных значений сигнала и шума: а) отсчеты квадратурных составляющих смеси сигнала с шумом; б) увеличенный сигнальный фрагмент диаграммы "а"

Таблица 2

Значения отношения сигнал / шум (по напряжению) в зависимости от ширины полосы радиотракта и спектральной плотности мощности шумов Q

Q [дБвт/Гц]	30	35	40	45	50
$q_0(\Delta f=20\text{МГц})$	0,00707	0,0126	0,0224	0,0398	0,0707
$q_0(\Delta f=10\text{МГц})$	0,01	0,0178	0,0316	0,0562	0,1
$q_0(\Delta f=1\text{кГц})$	1	1,78	3,16	5,62	10

В последней строке табл. 2 приведены значения q в полосе 1кГц (в результате суммирования отсчётов на 1мс интервале эпохи кода).

Из данных этой таблицы следует, что формулу (21) можно считать практически строгой.

Из рассмотрения рис. 6а следует, что фиксация отсчёта компоненты Q в момент перехода l через нуль (и наоборот) содержит погрешность по фазовому углу  $\pm \varepsilon/2$ . Опираясь на данные табл. 2 и приведённые выше рассуждения об отличии отсчётов от точных значений амплитуд, этой погрешностью можно пренебречь и считать, что отсчёты на фронтах меандров квадратурных составляющих погрешностей по фазе не содержат. Тогда, отбросив знаки этих отсчётов (что существенно упрощает реализацию накопления отсчётов промежуточной частоты на интервале кодового получипа), для распределения модуля нормальной случайной величины x можно записать [2]

$$|x| = 0, \quad x \leq 0$$

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_n} \left[ \varphi\left(\frac{x-x_0}{\sigma_n}\right) + \varphi\left(\frac{x+x_0}{\sigma_n}\right) \right], \quad x > 0, \quad (22)$$

где  $\varphi(t)$  – гауссова плотность вероятности, а  $x_0$  и  $\sigma_n$  математическое ожидание и СКО (соответственно) исходного распределения  $\varphi(t)$ .

СКО распределения (22) при малом  $x_0$  ( $x_0 \rightarrow 0$ ) связано с  $\sigma_n$  исходного нормального распределения соотношением [2]

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi-2}{\pi}} \sigma_n \approx 0,6028 \sigma_n. \quad (23)$$

В приёмнике с согласованным фильтром каждые примерно 0,5 мкс (при полупериодном окне поиска GPS) или 1 мкс (GLONASS) формируется взвешенная со знаками ожидаемого кода сумма

$$x_i = \sum_{k=1}^n p_{i-k}^{(\tau)} |\tilde{x}_i|, \quad (24)$$

где  $n$  для сигналов GPS равно 2046, а для GLONASS – 1022,

$|\tilde{x}_i|$  – модули (единица или нуль) квантованных на 3 уровня сигналов промежуточной частоты на интервале кодового полупериода,

$p_j^{(\tau)}$  – знак символа ожидаемого кода,

индекс  $\tau$  – проверяемая величина задержки кода.

В силу центральной предельной теоремы теории вероятностей  $x_i$  нормализуется практически полностью, и можно достаточно строго считать, что

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (25)$$

где  $\varphi(x)$  определена на всей числовой оси,

$m_x$  – математическое ожидание суммы (24),

$\sigma_x^2$  – дисперсия этой суммы.

При фазовой манипуляции несущей дальномерным псевдослучайным кодом вектор  $\vec{s}$  (рис. 6б) перебрасывается на  $180^\circ$  фронтами импульсов этого кода. Не нарушая общности, можно считать, что знак  $s$  положительный при передаче единичного символа кода и отрицательный при передаче нуля.

Из этого же рисунка следует, что при равномерном распределении угла  $\psi$  между векторами сигнала и шума в круге  $0 - 2\pi$  сигнальная добавка  $x_0$  к модулю вектора чистого шума положительна при передаче единицы в коде и отрицательна при передаче нуля.

Тогда для  $m_x$  можно записать

$$m_x = \frac{n}{2} (\bar{x}_0) - \frac{n}{2} (-\bar{x}_0) = n x_0. \quad (26)$$

В (26) отражён тот факт, что символов «единица» и «ноль» в ПСП одинаковое количество  $n/2$ . По этой же причине математическое ожидание суммы модулей шумовых компонент равно нулю.

Для дисперсии независимо от знаков символов кода в (24) справедливо [2]:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= n \sigma^2 = n \frac{\pi-2}{\pi} \sigma_n^2, \\ \sigma_x &= \sqrt{n \frac{\pi-2}{\pi}} \sigma_n. \end{aligned} \quad (27)$$

Для формирования адаптивных порогов (17) целесообразно рекуррентно оценивать СКП поступающей выборки, не обращая внимания на возможное обнаружение сигнала, поскольку это событие достаточно редкое в длинной последовательности отсчётов чистого шума и результат оценивания дисперсии шума (помех) исказить не может.

В монографии [1] приведены примеры расчёта (стр. 44, 45) выигрыша в среднем числе испытаний для достижения заданной вероятности правильного обнаружения при использовании последовательной процедуры Вальда по сравнению с однопороговой максимально правдоподобной процедурой (где необходимо предварительное накопление информации для выполнения заданных условий). Автор делает вывод о том, что выигрыш не зависит от исходного отношения сигнал/шум  $q$ , поскольку величина  $q$  в явном виде не входит в формулу (1.84) для расчёта этого выигрыша ([1], с. 44). Несправедливость этого вывода объясняется противоречием в постановке задачи. С одной стороны, утверждается, что формула (1.84) выводится для случая  $a_1 - a_0 = \sigma_1$ , т.е.  $q$  фиксировано и равно 1 ([1], с.44), с другой стороны, из таблицы 1.2 ([1], с.45) этого не следует.

Нас интересует следующая постановка задачи: любое значение отношения сигнал/шум из диапазона их реальных величин не обеспечивает заданной вероятности правильного обнаружения ( $P_{по}=0,999$ ) при анализе одного элемента выборки  $x$ . Эта вероятность может быть достигнута лишь за счёт накопления информации  $N$  элементов выборки (тривиальный вариант сдвига порога влево для достижения  $P_{по} = 0,999$  исключаем, т.к. он приводит к неприемлемому возрастанию вероятности ложной тревоги - до 0,54 при  $m = 3$ ). Поскольку расстояние между гипотезами  $m = q\sigma$ , а величина  $C_{мп} = m/2 = q\sigma/2$ , среднее число  $ms$  циклов для достижения  $P_{по}=0,999$  составит

$$\left( \frac{3,09\sigma}{C_{мп}} \right)^2 = \left( \frac{6,18}{q} \right)^2 = \bar{N}_{мп}.$$

Среднее число этих  $ms$  циклов при использовании двухпороговой процедуры Вальда вычислим как математическое ожидание числа  $N$  исходя из логики:

- эксперимент успешно закончится при  $N=1$  с вероятностью  $P_{по}$ ; если в первом цикле сигнал не обнаружен, то для обнаружения потребуется продолжить эксперимент;
- $N = 2$  с вероятностью  $(1 - P_{по})P_{по}$ ;
- $N = 3$  с вероятностью  $(1 - P_{по})^2 P_{по}$  и т.д.

$$M\{N\} = P_{по} [1 + 2(1 - P_{по}) + 3(1 - P_{по})^2 + \dots] \quad (28)$$

Этот ряд может быть представлен в виде суммы двух бесконечных рядов – геометрической прогрессии без единицы и ряда (33.2 [3])

$$1 + ax + (a + b)x^2 + (a + 2b)x^3 + \dots \quad (29)$$

при  $a = b = 1$  и  $x = 1 - P_{по}$ .

Сумма ряда (29) равна

$$S = 1 + \frac{ax + (b-a)x^2}{(1-x^2)} = 1 + \frac{1-P_{\text{по}}}{P_{\text{по}}^2}. \quad (30)$$

Тогда для  $M\{N\}$  имеем:

$$\bar{N}_B = M\{N\} = P_{\text{по}} \left( 1 + \frac{1-P_{\text{по}}}{P_{\text{по}}^2} + \frac{1-P_{\text{по}}}{P_{\text{по}}} \right), \quad (31)$$

где  $P_{\text{по}}$  рассчитывается по формуле

$$P_{\text{по}} = 1 - \Phi \left[ (3,09 - q) \sqrt{\frac{\pi - 2}{\pi}} \right]. \quad (32)$$

Выигрыш в среднем количестве циклов поиска для достижения вероятности правильного обнаружения 0,999 по критерию Вальда составит

$$\gamma = \left( \frac{6,18}{q} \right)^2 \bar{N}_B^{-1}. \quad (33)$$

Результаты вычислений по вышеприведённым формулам сведены в табл. 3.

Таблица 3

Выигрыш в среднем количестве циклов поиска по критерию Вальда по сравнению с максимумом правдоподобия

q	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0
$P_{\text{по}}$	0,69	0,73	0,76	0,79	0,82	0,84	0,89	0,93	0,96	0,98	0,99	1,0
$N_{\text{мп}}$	38,2	26,5	19,5	14,9	11,8	9,5	6,11	4,24	3,12	2,39	1,53	1,06
$N_B$	10,4	8,74	7,34	6,24	5,38	4,67	3,41	2,61	2,07	1,70	1,28	1,04
$\gamma$	3,69	3,05	2,65	2,39	2,19	2,04	1,79	1,63	1,51	1,40	1,20	1,02

Приведённые в таблице значения выигрыша двухпороговой процедуры Вальда по сравнению с максимально правдоподобной справедливы в схеме независимых испытаний, что автоматически выполняется в приёмнике смежной миллисекундных кадров, поступающих в обработку в реальном времени.

Здесь характерно заметное повышение выигрыша критерия Вальда с уменьшением  $q$  (ухудшением помеховой обстановки).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники, т.2. - М.: Сов. радио, 1975. - 390 с.
2. Справочник по вероятностным расчётам. - М.: Воениздат, 1966. - 407 с.
3. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. - М., Наука, 1977. - 224 с.

**АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ АНОМАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ ФАЗ СИГНАЛОВ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДИАПАЗОНА ОНЧ В ПЕРИОДЫ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

**Г. А. СЕМЕНОВ,  
А. И. КАБИРОВ,  
С. Б. ПИСАРЕВ**  
(ФГУП РИРВ)

*Приводятся зависимости вариаций эффективной высоты волновода «Земля-ионосфера» в периоды крупномасштабных ионосферных возмущений (КИВ), по которым оцениваются аномальные вариации фазы сигналов диапазона ОНЧ. Разработана программа, позволяющая выделить участки трасс, подверженные влиянию КИВ, для любой точки пространства на заданные дату и время. Выполнены оценки фазовых аномалий на трассах ФРНС «АЛЬФА-М» для среднестатистических оценок плотности потока энергии рентгеновского излучения, плотности потока протонов и оценки индекса магнитной активности, а также сделаны рекомендации по выбору радиотрасс для навигационных определений.*

Радионавигационная система ОНЧ диапазона обеспечивает достаточную для широкого круга пользователей точность местоопределения, однако эта точность может существенно снижаться при неблагоприятном расположении трасс распространения сигналов от передающих станций, а также в периоды крупномасштабных ионосферных возмущений (КИВ): внезапных ионосферных возмущений (ВИВ), солнечных протонных событий (СПС) и магнитных бурь (МБ). Критическим звеном в применении ОНЧ системы является определение радионавигационных поправок, учитывающих условия распространения радиоволн на конкретных трассах [1]. Необходимо отметить, что задача учета и контроля состояния ионосферы является одной из актуальных при эксплуатации систем радионавигации и связи, работающих в различных диапазонах радиоволн. В работе [2] описывается система мониторинга высокоширотной ионосферы, созданная в интересах обеспечения коротковолновой радиосвязи в полярной области. Одним из достоинств ОНЧ РНС является возможность контроля за состоянием ионосферы по ее собственным сигналам [3].

Отсутствие надежной глобальной модели волновода «Земля-ионосфера» не позволяет разработать алгоритм непосредственного обнаружения, идентификации и прогноза крупномасштабного ионосферного возмущения, такой алгоритм может основываться либо на регистрации значительных изменений фазы за короткий промежуток времени, либо на наличии данных мониторинга солнечной и магнитной активности. Зависимость фазы ОНЧ сигнала от регулярных вариаций состояния ионосферы и различных ионосферных возмущений ставит задачу выделения станций, сигналы от которых могут быть использованы для радионавигационных определений с заданной точностью. Естественно выбирать для этого такие станции, сигналы которых в меньшей степени подвержены воздействию ионосферных возмущений, а также менее зависимы от состояния ионосферы в авроральной и полярной областях в спокойных условиях. Для решения указанной задачи разработаны алгоритмы и программа. Они позволяют для любой точки земного шара и для



любого момента времени проложить на земном сфероиде трассы распространения сигналов от станций РНС диапазона ОНЧ, разбить эти трассы на участки, относящиеся к областям проявления ВМВ, СПС и МБ, и оценить при их наличии возможные вариации фазы сигналов. По величине последних определяется весовой коэффициент каждого измерения при оценивании координат объекта.

В дополнение к изложенному необходимо учитывать [4, 5], что данные электромагнитного мониторинга параметров радиосигнала ОНЧ диапазона в комплексе с другими средствами могут служить краткосрочными предвестниками землетрясений. Надежность выявления аномалий, связанных с землетрясениями, и, соответственно, их прогноза в значительной степени зависит от вероятности исключения из наблюдаемых данных маскирующих и сопутствующих эффектов, к которым, в частности, относятся КИВ. Разработанные алгоритмы могут повысить вероятность правильного обнаружения аномалий, вызванных землетрясениями, так как априори позволяют выделить трассу (участки трасс), подверженные влиянию КИВ.

### 1. Алгоритм учета внезапных ионосферных возмущений (ВИВ)

Исследования фазовых аномалий во время ВИВ позволили создать модели изменения профиля электронной концентрации в D-области ионосферы [6]. Понижение эффективной высоты волновода «Земля-ионосфера» при ВИВ определяется зависимостью

$$\Delta h(t) = a \ln(1 + bX(t))(1,52 + \cos \chi(t)), \quad (1)$$

где  $\Delta h(t)$  - приращение высоты, км;

$X(t)$  - плотность потока энергии рентгеновского излучения, Вт/см<sup>2</sup>;

$\chi(t)$  - зенитное расстояние Солнца, град.;

$t$  - время московское, час;

$a, b$  - константы, зависящие от геомагнитной широты  $\varphi_m$  и сезона, численные значения которых приведены в таблице.

Значения констант  $a$  и  $b$

$\varphi_m$ , град.						
	0 - 30			30 - 40	40 - 50	50 - 60
	лето	зима	весна-осень			
$a$	1,12	1,52	1,18	0,8	0,8	0,52
$b$	$1,41 \cdot 10^6$	$1,44 \cdot 10^6$	$1,49 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^7$	$1,28 \cdot 10^6$

### 2. Алгоритм учета солнечных протонных событий (СПС)

Исследования фаз сигналов ОНЧ РНС на полярных, авроральных и субавроральных трассах показали, что по фазовым аномалиям на таких трассах можно надежно идентифицировать не только мощные [7], но и умеренные и слабые [8] солнечные протонные события. Граница проявления соответствующих эффектов, оказывается, зависит от вариаций геомагнитного поля [9].

Возмущения этого типа происходят в полярной области и имеют нижнюю границу для  $\varphi_m$ :

$$\varphi_m = 65,2^0 + 0,035^0 \cdot D_{st} - \text{в восстановительной фазе};$$

$$\varphi_m = 60,4^0 + 0,027^0 \cdot D_{st} - \text{в главной фазе};$$

$D_{st}$  - индекс магнитной активности, нТ.

Понижение эффективной высоты ионосферы при СПС определяется зависимостью

$$\Delta h(t) = (1 - g(\chi(t)))(1,9 \ln P(t) - 1) + g(\chi(t))(1,8 \ln P(t) + 7), \quad (2)$$

где  $P(t)$  - плотность потока протонов,  $см^{-2} с^{-1}$ ;

$g(\chi(t))$  - суточная функция определяющая изменение высоты волновода от освещенности трассы [1].

### 3. Алгоритм учета магнитных бурь (МБ)

Изменение эффективной высоты волновода при МБ определяется зависимостью

$$\Delta h(t) = S_1 S_2 S_3(t) S_4(t), \quad (3)$$

где  $S_1 = D_{st}$ ;

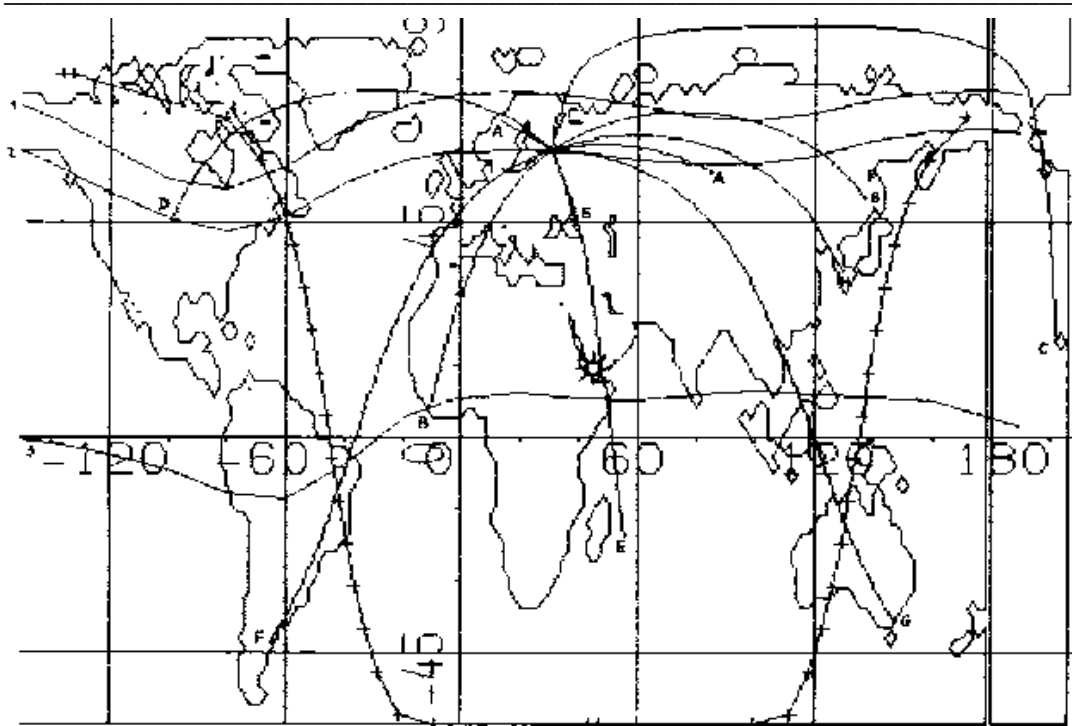
$$S_2 = \begin{cases} 0,012(\varphi_m - 40^0), & \text{если } \varphi_m = 40^0 - 50^0; \\ 0,012, & \text{если } \varphi_m = 50^0 - 60^0; \end{cases}$$

$$S_3(t) = \begin{cases} 0, & \text{июнь, июль}; \\ 0,25, & \text{май, август}; \\ 0,5, & \text{апрель, сентябрь}; \\ 0,75, & \text{март, октябрь}; \\ 1,0, & \text{ноябрь, декабрь, январь, февраль}; \end{cases}$$

$$S_4(t) = \begin{cases} 0,5, & \text{если } \chi(t) \leq 85^0; \\ 0,75, & \text{если } 85^0 < \chi(t) < 98^0; \\ 1,0, & \text{если } \chi(t) \geq 98^0. \end{cases}$$

### 4. Описание выводимой информации и результатов вычислений

Для оценивания возможных аномальных вариаций фазы на радиотрассах ФРНС диапазона ОНЧ, по величинам которых производится выбор сигналов для надежных навигационных определений, была создана программа, позволяющая по моделям спокойной [6] и возмущенной ионосферы (1, 2, 3) выполнять расчеты для любой точки пространства на любые дату и момент времени. Для проверки эффективности приведенных зависимостей (1, 2, 3) по результатам «прошлых» экспериментальных данных и последующей их коррекции программа позволяет выполнить расчеты для всех станций ФРНС «АЛЬФА-М» [5] и «ОМЕГА».



РНС	ТРАССА	ПОЛЯРНАЯ ОБЛАСТЬ			АВРОРАЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ			СРЕДНЕШИР. ОБЛАСТЬ			ЭКВАТОР. ОБЛАСТЬ.			ВИБ	СПС	МБ
		R, тыс. км	R, тыс. км	k сц / км	% по пр	R, тыс. км	k сц / км	% по пр	R, тыс. км	k сц / км	% по пр	R, тыс. км	k сц / км			
АЛЬФА-М	A 3.2	0.0	0.0	0	3.2	1.9	97	0.0	0.1	2	0.0	0.0	0	0	0	7
	B 1.7	0.0	0.0	0	0.2	0.3	22	1.5	0.9	77	0.0	0.0	0	2	0	4
	B 6.1	2.7	1.5	41	2.2	1.6	42	1.2	0.6	16	0.0	0.0	0	0	20	11
	Г 0.9	0.0	0.0	1	0.9	0.6	98	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0	2	2
ОМЕГА	A 1.1	0.0	0.0	0	1.1	0.6	99	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0	1	2
	B 6.9	0.0	0.0	0	0.2	0.3	6	2.5	1.7	38	4.2	2.4	55	12	0	4
	C 11.0	4.7	3.0	51	1.7	1.1	19	2.2	1.4	24	2.2	0.3	4	0	31	14
	D 7.3	5.4	2.5	67	2.0	1.2	32	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0	28	9
	E 9.3	0.0	0.0	0	0.2	0.3	4	2.2	1.6	26	6.8	4.3	69	28	0	4
	F 14.3	0.0	0.0	0	0.2	0.4	5	3.2	2.1	25	10.8	5.7	68	10	0	6
	G 15.1	0.0	0.0	0	1.5	1.1	12	4.5	3.1	35	9.1	4.7	52	14	0	26
	H 7.3	0.0	0.0	0	4.0	2.3	56	2.3	1.4	32	1.0	0.4	10	2	10	12

Трассы распространения сигналов от станций ОНЧ радионавигационных систем и оценка чувствительности фаз сигналов к состоянию ионосферы для КП в г. Санкт-Петербурге на 15 августа, 12 ч московского зимнего времени (1, 2 – границы авроральной зоны, 3 – геомагнитный экватор, +++ - терминатор, приемник находится в освещенной области, \* - проекция Солнца).

На рисунке представлен блок выводимой информации, который для наглядности содержит карту мира, позволяющую представить расположение

трасс распространения относительно терминатора, геомагнитного экватора и условных границ авроральной зоны ( $60^0 < \varphi_m < 70^0$ ), и таблицу с результатами вычислений. Для примера приведены результаты расчетов на координаты контрольного пункта в г. Санкт-Петербурге ( $\varphi = 60^0 N$ ,  $\lambda = 30^0 E$ ) на 15 августа 12 ч московского времени.

Расчеты проведены по моделям спокойной и возмущенной ионосферы [6] на частоте 11,9 кГц для станций РНС «АЛЬФА-М» и на частоте 13,6 кГц для станций РНС «ОМЕГА». Каждая строка таблицы относится к станции, код которой указан в первом столбце. Во втором столбце приведены расстояния от станции до контрольного пункта в тыс. км. Далее следуют четыре однотипных блока по три столбца в каждом. Эти блоки содержат информацию о полярной, авроральной, среднеширотной и экваториальной областях. В первом столбце блока приводится протяженность участка трассы, находящегося в пределах соответствующей области земного шара. Число из второго столбца указывает величину отклонения фазы сигнала при изменении на 1 км высоты ионосферы в соответствующей зоне. Третье число является показателем того, в какой мере (на сколько процентов) радионавигационный параметр зависит от состояния ионосферы в данном географическом районе. Последние три столбца таблицы содержат сведения о возможных фазовых аномалиях при внезапных ионосферных возмущениях, солнечных протонных событиях и магнитных бурях. Оценки выполнены для среднестатистических значений возмущающих параметров: для внезапного ионосферного возмущения при величине плотности потока энергии рентгеновского излучения  $X=10^{-5} \text{Вт/см}^2$ , для солнечного протонного события при плотности потока протонов  $P=20 \text{ см}^2 \text{с}^{-1}$ , для магнитной бури при значении индекса  $D_{st}=-100 \text{ нТ}$ .

### 5. Пример пользования таблицей

Рассмотрим результаты расчетов, помещенных в блок информации на рисунке. По карте определяем, что в данный момент времени контрольный пункт находится в освещенной области земного шара, и трассы от станций РНС «АЛЬФА-М» целиком лежат в освещенной области, в то время как освещенность трасс от станций РНС «ОМЕГА» разная: трассы от станций А, В, Е, Н освещены целиком, а трассы от станций С, D, F, G находятся в смешанных условиях по освещенности. Нетрудно увидеть также, что трассы от станций С и D пересекают полярную шапку, а трассы от станций А, В, Г РНС «АЛЬФА-М» и от станции А РНС «ОМЕГА» являются авроральными.

Обратимся теперь к таблице. Разберем для примера трассу от станции С РНС "ОМЕГА". Протяженность трассы С (Гавайские о-ва – г. Санкт-Петербург) составляет 11,0 тыс. км, из них 4,7 тыс. км - полярный участок, 1,7 тыс. км находится в авроральной области, в средних широтах пролегают 2,2 тыс. км трассы, а в экваториальной области лежит участок длиной 2,2 тыс. км. Понижение высоты ионосферы на 1 км в полярной области приведет к увеличению радионавигационной поправки на 3,0 сц, в авроральной области - увеличит поправку на 1,1 сц, в средних широтах - увеличит поправку на 1,4 сц, а в экваториальной области при таком же понижении высоты ионосферы рост поправки составит 0,3 сц. Радионавигационная поправка в наиболее значи-

тельной степени зависит от состояния ионосферы. Наибольшая зависимость от ионосферы наблюдается в полярной шапке (51%), существенно зависимость в авроральной (19%) и среднеширотной (24%) областях ионосферы, а состояние ионосферы в экваториальной области лишь на 4% определяет значение радионавигационной поправки на трассе.

В выбранный момент времени трасса нечувствительна к внезапным ионосферным возмущениям, и в то же время фаза сигнала в сильной степени подвержена влиянию солнечных протонных событий и магнитных бурь. Так, при возникновении потока протонов плотностью  $P=20 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  величина фазовой аномалии составит 31 сц, а в период магнитной бури с  $D_{st} = -100 \text{ нТ}$  скачок фазы равняется 5 сц. Для сравнения, сигнал от станции E, напротив, практически не подвержен ни солнечным событиям, ни магнитным бурям, зато эта трасса весьма чувствительна к внезапному ионосферному возмущению: возрастание плотности потока энергии рентгеновского излучения до  $10^{-5} \text{ Вт/см}^2$  приведет к увеличению радионавигационной поправки на 28 сц.

В рассматриваемый момент времени для обнаружения и идентификации внезапных ионосферных возмущений лучше всего использовать наблюдения за фазой сигналов станций B, E и G ФНС «ОМЕГА», в то время как фаза сигнала станции F ФНС «ОМЕГА» для этой цели малоприспособна, поскольку изменение фазы на этой трассе имеет характер, соответствующий восходу Солнца, то есть меняется в ту же сторону, что и при внезапном ионосферном возмущении.

По рассчитанным величинам фазовых аномалий любой природы, задаваясь допустимым порогом дополнительной погрешности определения радионавигационного параметра (РНП)  $\varphi_{доп.}$ , можно выбрать станции, сигналы которых с большей степенью надежности могут применяться для навигационных определений. Так, при  $\varphi_{доп.} = 5$  сц следует использовать станции А, Б, Г ФНС «АЛЬФА-М» и станцию А ФНС «ОМЕГА»; при  $\varphi_{доп.} = 10$  сц – станции А, Б, Г ФНС «АЛЬФА-М» и станции А, F, E ФНС «ОМЕГА». Величина возможной дополнительной погрешности РНП, вызываемой КИВ, входит составной частью в обобщенную модель погрешности измерений.

### Выводы

1. Приведенные зависимости вариаций эффективной высоты волновода «Земля ионосфера» в периоды КИВ позволяют априори выделить радиотрассы, на которых возможны аномальные вариации фазы и приближенно оценить их величины.
2. Полученные результаты можно использовать при построении алгоритмов обнаружения, идентификации и прогноза крупномасштабных ионосферных возмущений по наблюдениям на контрольных пунктах ФНС диапазона ОНЧ.
3. Полученные алгоритмы могут быть положены в основу процедуры обнаружения и идентификации аномалий параметров поля ОНЧ, вызываемых землетрясениями, после отбраковки маскирующих эффектов, связанных с крупномасштабными ионосферными возмущениями.

4. Прогнозируемые значения аномалий фазы в периоды крупномасштабных ионосферных возмущений необходимо использовать при задании элементов корреляционной матрицы погрешностей измерений при навигационных определениях.

Авторы выражают благодарность М.А.Бисярину за разработку программы и проведение расчетов для оценки зависимости фазы сигналов ОНЧ РНС от состояния ионосферы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Радионавигационные системы сверхдлинноволнового диапазона / С. Б.Болошин, Г. А.Семенов, А. С. Гузман и др. - М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
2. Rose R.B., A high – latitude ionospheric disturbance impact assessment system: Radio Science. - 1993. - Vol. 28, № 1. P. 97-104.
3. Болошин С. Б., Вербин Ю. П., Лось Б. П., Семенов Г. А.. Детектирование крупномасштабных ионосферных возмущений по сигналам ОНЧ радионавигационной системы на авроральных и субавроральных радиотрассах// Проблема дифракции и распространения волн. – 1997. - Вып. 27, - Изд-во СПбГУ. - С. 112-115.
4. Вербин Ю. П., Кишук В. П., Семенов Г. А., Болошин С. Б.. К проблеме прогнозирования землетрясений по данным мониторинга характеристик естественных и антропогенных электромагнитных полей // Радионавигация и время. – 1996. - № 1, 2 (7). - С. 29-33.
5. Болошин С. Б., Кабиров А. И., Писарев С. Б., Семенов Г. А.. Фазовая РНС диапазона СДВ: возможности и перспективы // Навигация и гидрография. – 2001. - № 12. - С. 98-105.
6. Орлов А. Б., Пронин А. Е., Уваров А. Н.. Моделирование профилей электронной концентрации нижней ионосферы по данным о распространении СДВ // Проблемы дифракции распространения волн. – СПб: изд-во СПбГУ, 2000. - Вып. 28. - С. 83-114.
7. Вербин Ю. П., Макарова Л. Н., Семенов Г. А., Широчков А. В. Детектирование мощных солнечных протонных событий по записям вариаций фазы ОНЧ радиоволн // Геомагнетизм и аэрономия. - 1998. - Т. 38. - № 1. - С. 101-107.
8. Вербин Ю. П., Зарх А. З., Семенов Г. А., Бисярин М. А.. О возможности обнаружения слабых и умеренных солнечных протонных событий по вариациям фазы ОНЧ радиоволн на авроральных и субавроральных радиотрассах // Тез. докл. XXIII Региональной конференции по распространению радиоволн. С-Пб: 1997. - С. 63
9. Бобров М. С., Об условиях, приводящих к усеченным формам  $D_{st}$  - вариации // Геомагнетизм и аэрономия. -1991. - Т. 31. - № 3. - С. 410-413.

ГРНТИ 47.49.31

### ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НА СУДНЕ ЦЕНТРА МАСС ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

**Ю. И. НИКИТЕНКО**

(ГМА им. адм. С.О. Макарова)

*Обсуждаются принципы построения алгоритмов оперативного определения на судне текущего местоположения центра масс с помощью подлежащей модернизации аппаратуры СРНС.*

#### 1. Введение. Системы координат. Постановка задачи

1.1. Для обеспечения высокой достоверности текущей оценки степени устойчивости находящегося в экстремальной ситуации судна необходимо [1] с высокой точностью знать местоположение центра масс и проходящей через эту точку оси вращения судна. Это требуется и для обеспечения потенциаль-

ной точности радиолокационных и гидроакустических систем геофизической разведки и съемки рельефа дна. Однако пока в мире ни на одном надводном объекте нет высокоточного инструмента для непрерывной и оперативной высокоточной оценки указанных выше параметров судна.

Первые попытки преодолеть такое положение сделаны автором после завершения многолетних исследований особенностей использования фазы сигналов СРНС для угловой пространственной ориентации судна (с аспирантами ГМА и РИРВ). Освоение геометрических взаимосвязей [2] измеряемых и реальных параметров в СРНС оказалось плодотворным. Выявленные соотношения для оценки положения оси вращения судна, проходящей через центр масс, докладывались на постоянно действующем семинаре по морским информационным технологиям (6 ноября 1998 г.), которым руководит чл.-корр. РАН А. Е. Сазонов, и опубликованы [3, 4]. В указанных работах излагается также и способ определения длины  $L$  траектории движения точки закрепления приемной антенны. Он оказался полезным при построении алгоритма, описанного в п. 3 настоящей статьи.

С методической точки зрения, для понимания принципов функционирования найденных алгоритмов целесообразно учитывать, что далее одни и те же точечные объекты должны рассматриваться одновременно в двух ортогональных системах координат.

**1.2.** Судовая ортогональная система координат фиксируется в процессе строительных работ. Оси системы, как и в работах [3, 4], пусть обозначаются как  $(a, b, h)$ , они направлены соответственно по правому борту, по носу и вверх. На судне в выбранных и точно зафиксированных точках  $q$  закрепляется не менее трех антенн. Антенна с номером  $i$  имеет, таким образом, известные судовые координаты  $(a_i, b_i, h_i)$  и удалена на известное расстояние  $r_i = (a_i^2 + b_i^2 + h_i^2)^{1/2}$  относительно начальной точки  $(a_0=0, b_0=0, h_0=0)$  судовой системы. Эта точка расположена заведомо ниже искомой точки центра масс с координатами  $(a_{ц}, b_{ц}, h_{ц})$ , которые будут найдены по результатам измерений горизонтных координат  $\{X_{ц}, Y_{ц}, Z_{ц}\}$  этой же точки.

**1.3.** Горизонтная ортогональная система координат с некоторой выбранной начальной точкой в плоскости горизонта пусть, как и в работах [3, 4], имеет ось ординат  $y$ , направленную по меридиану (или по выбранному отрезку прямой на плоскости горизонта). Ось аппликата  $z$  направлена вверх, а ось абсцисс  $x$  направлена так, что образуется правая система координат. Однозначные фазовые отсчеты обеспечивают в АП относительные местоопределения каждой антенны с горизонтными координатами  $\{x_i, y_i, z_i\}$ , погрешность которых составляет миллиметры. При обсуждении лишь принципов определения на судне центра масс этой погрешностью можно пренебречь, как и тем обстоятельством, что абсолютные местоопределения всех антенн могут характеризоваться одинаковыми погрешностями порядка метров.

**1.3.1.** Искомой точке центра масс судна соответствуют координаты  $\{X_{ц}, Y_{ц}, Z_{ц}\}$ , возможностям определения которых посвящена статья.

**1.3.2.** Начальной точке судовой системы будут в горизонтной системе соответствовать координаты  $\{X_0, Y_0, Z_0\}$ , которые находятся с использованием

известных из аналитической геометрии алгоритмов преобразования координат [8, п.3.1-12], содержащих девять направляющих косинусов НК углов, которые определяют пространственную ориентацию судна.

**1.4.** Итак, по результатам измерений и использования формул преобразования координат становятся известными не только судовые  $\{a_i, b_i, h_i\}$ ,  $\{a_0=0, b_0=0, h_0=0\}$ , но и горизонтные  $\{x_i, y_i, z_i\}$ ,  $\{X_0, Y_0, Z_0\}$  координаты всех интересующих нас зафиксированных точек закрепления антенн и начальной точки строительной судовой системы координат.

Требуется построить алгоритм оценки искомых координат точки  $\{a_{ц}, b_{ц}, h_{ц}\}$  центра масс в судовой системе координат по результатам определения координат  $\{X_{ц}, Y_{ц}, Z_{ц}\}$  в горизонтной системе.

## **2. Алгоритм с оценкой центров кривизны траектории перемещения антенн**

**2.1.** Принципиальную возможность создания высокоточного оперативно-го инструмента для местоопределения центра масс [5] рассмотрим сначала на примере идеализированных условий эксперимента (их можно воспроизвести при сдаточных испытаниях) с выключенными двигателями, когда центр масс и ось вращения корпуса совпадают. Лишь после решения подобных задач можно пытаться учесть влияние работающего двигателя.

Пусть в условиях эксперимента судно имеет лишь бортовую качку. Таковую ситуацию можно воссоздать на невзволнованной поверхности моря путем резкого сброса первоначально натянутого причального конца и т.п. Проведем за полупериод качки сверхточные определения текущих координат точек траекторий движения трех-четырех закрепленных на судне приемных антенн (зондов). Найдем аналитическое выражение для этих отрезков траекторий. По известным формулам определим положение центров кривизны отрезков траекторий на фиксированный момент времени. Прямая, проходящая через эти центры кривизны, и будет являться продольной осью вращения на данный момент времени. Изменив условия эксперимента и добившись лишь килевой качки, можно найти положение поперечной оси вращения. Точка пересечения найденных продольной и поперечной осей даст положение центра масс корпуса судна.

**2.2.** При одновременно существующих бортовой и килевой качках необходимо использовать результаты, приведенные в публикациях [3, 4], где весь процесс определения параметров оси вращения и центра масс судна разбивается на четыре этапа. **На первом этапе** реализуется алгоритм определения текущих параметров матрицы угловой пространственной ориентации (направляющих косинусов) осей судовой системы координат относительно горизонтной системы. **На втором** - находится ориентация мгновенной оси вращения судна в горизонтной системе координат. Для этого используется выявленная функциональная связь орта этой оси с происшедшими за небольшой интервал времени изменениями угловой ориентации судна. Затем, **на третьем этапе** находятся центры кривизны траекторий перемещения приемных антенн, а наиболее правдоподобное положение оси вращения судна определяется так, чтобы сумма квадратов кратчайших расстояний всех центров до этой оси была минимальной. **На четвертом этапе** определяются параметры ориентации осей



вращения судна в судовой системе координат в разные интервалы времени. Точка пересечения осей и соответствует центру масс судна.

### **3. Алгоритм с оценкой протяженностей отрезков траекторий движения приемной антенны и начала судовой системы координат**

**3.1.** Пусть, как и в 2.1, приемлема модель идеальной бортовой качки, и антенна с судовыми координатами  $(0 \text{ b } h_A)$  находится над центром масс  $(0 \text{ b } h_C)$  с искомой аппликацией  $h_C$  в продольной плоскости судна. Представим себе, как перемещаются антенна и начало судовых координат в процессе перевалки судна с левого на правый борт вокруг неподвижной точки центра масс. Если измеренные длины отрезков траекторий при этом оказались соответственно равными  $L_A$  и  $L_C$ , то не представляет труда установить простое явное выражение для искомой величины высоты продольной оси вращения  $h_C = h_A L_C / (L_A + L_C)$ . Такая же формула получится и при неравных значениях  $b_A$  и  $b_C$ . Несколько более сложные выкладки и формулы будут соответствовать случаю произвольного расположения антенны и центра масс.

**3.2.** При реальной качке возможности алгоритма с оценкой статистически обработанных ансамблей длин отрезков траекторий  $L_A$  и  $L_C$  должны быть детально и отдельно обследованы. Заметим, что при определении центров кривизны по п. 2 необходимо вычислять вторую производную по экспериментально снятым точкам траектории с неизбежными увеличением влияния случайных погрешностей. В алгоритме п. 3 такой эффект отсутствует.

### **4. Направления модернизации аппаратуры потребителя СРНС**

Принципиально важное обстоятельство, отраженное в п. 1.3.2, указывает на целесообразность проведения НИОКР для модернизации той аппаратуры потребителя, которая сейчас обеспечивает (или сможет обеспечить при небольших переделках) определение параметров пространственной угловой ориентации судна.

**4.1.** Наиболее приемлемой будет аппаратура потребителей с двумя-тремя малобазисными интерферометрами. Такая аппаратура выпускается, например, зарубежными фирмами «Аштек», «Тримбл», «Фуруно». Основным объектом модернизации явится программно-алгоритмическое обеспечение в соответствии с результатами отдельной НИР, развивающей основные принципы настоящей статьи.

**4.2.** В процессе проведения исследовательских судостроительных работ может возникнуть потребность в более точных результатах, которых можно достичь при увеличении разноса приемных антенн. Возможно, здесь после соответствующей модернизации программного обеспечения (и даже комплексирования с аппаратурой п. 4.1.) окажется приемлемой аппаратура «Землемер», используемая сейчас для геодезических работ [6, 7] и изготавливаемая в РИРВ.

### **5. Заключение**

Выводы, изложенные в статьях [3, 4], и последующие исследования доказывают реальность создания высокоточного оперативного измерителя местоположения центра масс в теоретическом плане, но пока лишь намечают

подступы к созданию реальных алгоритмов. Необходимо сравнить показатели возможных вариантов алгоритмов и их отдельных блоков, а также варианты размещения и расположения приемных антенн и методы обеспечения однозначности фазовых измерений как в обычно используемых интерферометрах, так и в «квазиинтерферометрах», рассмотренных в упомянутых статьях. Требуется разработка программы для ПЭВМ и выполнение численного моделирования. Необходимо количественно оценить достижимые точности.

Требуется серьезное исследование возможностей определения центра масс судна при различных режимах работы двигателя и рулевого устройства. Только на базе теории реальных процессов движения судна можно пытаться разрабатывать рекомендации по выбору подходящих режимов работы двигателей и ориентации корпуса судна относительно волнения моря.

Эти темы могут разрабатываться как в исследовательских дипломных, так и аспирантских работах.

Автор выражает благодарность Н. С. Зимину, Н. А. Иванову, Ф. М. Кацману, Г. Н. Милькину за участие в обсуждении статьи и полезные советы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кацман Ф. М., Дорогостайский Д. В., Коннов А. В., Коваленко Б. П. Теория и устройство судов. - Л.: Судостроение, 1991. - 416 с.
2. Никитенко Ю. И., Лукьянова М. А. Геометрические особенности задачи ориентации интерферометра по одномоментным неоднозначным отсчетам фазы сигналов ИСЗ // Радионавигация и время. – 1997. - № 1, 2(8). - С. 79-83.
3. Никитенко Ю. И. Возможности определения положения оси вращения судна по фазе сигналов СРНС // Проблемы развития морского флота. Сб. науч. трудов. ЦНИИМФ. - СПб, 1999. - С. 161–166.
4. Никитенко Ю. И. Расширение круга навигационно-динамических параметров, оцениваемых по фазе сигналов спутниковых РНС // Навигация и гидрография. – 2000. - № 10. - С. 85-92.
5. Никитенко Ю. И., Иванов Н. А. Извлечения информации о векторе положения судна в спутниковых РНС. Учебное пособие (в печати).
6. Кутиков В. Ю., Сошин М. П., Шебанов А. А., Шебшаевич Б. В. Перспективная аппаратура дифференциальной геодезической подсистемы спутниковых РНС Глонасс и GPS // Радионавигация и время. – 1992. - № 1. - С. 64-67.
7. Спутниковая геодезическая система ЗЕМЛЕМЕР Л1 // Радионавигация и время. – 1996. - №1.2 (7). С. 27.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука. – 1984. – 831 с.

**ВАРИАНТЫ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСИ ВРАЩЕНИЯ И ЦЕНТРА МАСС СУДНА ПО СИГНАЛАМ СРНС****Ю. И. НИКИТЕНКО,  
Н. А. ИВАНОВ**

(ГМА им. адм. С. О. Макарова)

*Приемы элементарной геометрии позволили выявить простой алгоритм определения оси вращения и центра масс судна по измеренным координатам трех точек траектории перемещения приемной антенны.*

*Обсуждаются особенности построения и направлений исследований подобных алгоритмов для обработки по методу наименьших квадратов всех местоопределяемых точек траектории.*

**1. Введение**

1.1. Теоретическое обоснование возможностей определения оси вращения и центра масс (ЦМ) судна приведено в работах [1, 2], где использованы взятые из дифференциальной геометрии понятия и параметры (кривизна и центр кривизн) при наличии измеренных координат точек траектории перемещения неподвижно закрепленных приемных антенн спутниковой РНС. Эти антенны, закрепляемые в точно известных точках на внешних поверхностях судовых надстроек и мачт, можно уподобить миниатюрным зондам, передающим в блок обработки информацию о своих координатах (например, горизонтных) с полусантиметровой относительной точностью. Особенно адекватно такое представление будет соответствовать спутниковым РНС возможного в будущем третьего поколения – с увеличенной на порядок несущей частотой и миллиметровой точностью измерения приращения расстояний по фазе.

Исследования [1, 2] были в основном стимулированы тем обстоятельством, что знание места центра масс необходимо для обеспечения потенциальной точности радиолокационных и гидроакустических систем разведки и съемки рельефа дна.

При этом выявились возможности создания измерительного прибора, до сих пор отсутствующего на надводных судах. Обобщенный облик такого прибора должен включать цветной дисплей, отражающий, помимо цифровых результатов количественной оценки параметров, динамику перемещения двух объектов, обозначенных своими цветами и символами: 1 - центр масс; 2 - расположение и ориентация текущего положения оси вращения корпуса судна относительно других объектов, влияющих на остойчивость и безопасность судна. Такой дисплей особенно необходим для обеспечения высокой достоверности текущей оценки степени остойчивости находящегося в экстремальной ситуации судна.

1.2. В публикациях [1, 2] проблема рассматривалась в слишком общих чертах, с использованием максимально обобщенного и поэтому усложненного математического аппарата при рассмотрении одновременно существующих бортовой и килевой качках судна. В упомянутых работах весь процесс определения параметров оси вращения (и центра масс) судна разбивается на четыре этапа. **Сначала** реализуется алгоритм определения текущих пара-

метров матрицы угловой пространственной ориентации осей судовой системы координат относительно горизонтной системы. **На втором этапе** находится ориентация мгновенной оси вращения судна в горизонтной системе координат с помощью выявленной функциональной связи орта этой оси с происшедшими за небольшой интервал времени изменениями матрицы элементов-параметров угловой ориентации судна. **На третьем этапе** с использованием аппарата дифференциальной геометрии находятся центры кривизны траекторий перемещения приемных антенн, а наиболее правдоподобное положение оси вращения судна определяется так, чтобы сумма квадратов кратчайших расстояний всех центров до этой оси была минимальной. Наконец, **на четвертом этапе** определяются параметры ориентации осей вращения судна в судовой системе координат в разные интервалы времени. Точка пересечения осей и соответствует центру масс судна (при выключенных двигателях) или центру вращения при наличии внешних сил.

Статьи [1, 2] доказывают реальность решения проблемы в теоретическом плане, но содержат лишь подступы к созданию реальных алгоритмов. Первые же попытки приложения [1, 2] к построению реализуемых алгоритмов указали на целесообразность более простых механических и геометрических представлений. Цель настоящей статьи - осветить особенности и неизбежно возникающие специфические трудности построения и оценки точности выявляемых алгоритмов.

1.3. В дальнейшем для обеспечения компактности и облегчения одновременного рассмотрения точечных объектов в двух используемых ортогональных системах координат (судовой и горизонтной) употребляются следующие обозначения.

Оси судовой системы ( $a$ ,  $b$ ,  $h$ ) направлены соответственно по правому борту, по носу и вверх. На судне в выбранных и точно зафиксированных точках закрепляется (пусть с пренебрежимой погрешностью) не менее трех антенн с номерами  $i$  и координатами  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $h_i$ , относительно начальной точки ( $a_0=0$ ,  $b_0=0$ ,  $h_0=0$ ), которая расположена заведомо ниже искомой точки центра масс с координатами ( $a_{ц}$ ,  $b_{ц}$ ,  $h_{ц}$ ).

Горизонтная ортогональная система координат с некоторой выбранной начальной точкой в плоскости горизонта имеет ось ординат  $y$ , направленную по меридиану (или по выбранному отрезку прямой на плоскости горизонта). Ось аппликата  $z$  направлена вверх, а ось абсцисс  $x$  направлена так, что образуется правая система координат. Однозначные фазовые отсчеты обеспечивают в АП относительные местоопределения каждой антенны с горизонтными координатами  $\{x_i, y_i, z_i\}$ , погрешность которых составляет миллиметры, хотя абсолютные местоопределения всех антенн могут характеризоваться одинаковыми погрешностями порядка метров. Пусть относительная среднеквадратическая погрешность каждой антенны будет равна  $\sigma_A \approx 0,4$  см.

Начальной точке ( $a_0=0$ ,  $b_0=0$ ,  $h_0=0$ ) судовой системы в горизонтной системе будут соответствовать координаты  $\{X_0, Y_0, Z_0\}$ , которые можно найти, используя известные из аналитической геометрии ([3], п.3.1-12) алгоритмы преобразования координат, содержащих девять направляющих косинусов НК углов, выражающих пространственную ориентацию судна, определяемую в одном из режимов функционирования нестандартной АП.

Итак, по результатам измерений и использования формул преобразования координат известны не только судовые  $\{a_i, b_i, h_i\}$ ,  $\{a_0=0, b_0=0, h_0=0\}$ , но и горизонтные  $\{x_i, y_i, z_i\}$ ,  $\{X_0, Y_0, Z_0\}$  координаты всех интересующих нас зафиксированных точек закрепления антенн и начальной точки строительной судовой системы координат. Искомые координаты точки  $\{a_{ц}, b_{ц}, h_{ц}\}$  центра масс в судовой системе координат находятся лишь по результатам определения координат  $\{X_{ц}, Y_{ц}, Z_{ц}\}$  в горизонтной системе.

1.4. При первом знакомстве с темой методически целесообразно из всего многообразия разновидностей движения судна ([4], с.185) ограничиться рассмотрением моделей с выключенными движителями, освоив прежде всего модели идеальной бортовой качки судна, когда центр масс находится на оси вращения, параллельной продольной оси судна. Идеализированные условия эксперимента можно воспроизвести при сдаточных испытаниях с выключенными двигателями (когда центр масс и ось вращения корпуса совпадают). Лишь после решения подобных задач можно пытаться ставить задачу учета влияния работающего двигателя и гидравлических эффектов, способствующих образованию вынужденных осей вращения, расположенных выше уровня ватерлинии.

1.5. Далее ограничимся рассмотрением особенностей использования лишь измеренных координат одной антенны. В идеализированной модели бортовой качки круговая траектория приемной антенны параллельна поперечной плоскости (точки окружности имеют одинаковые ординаты). Текущие координаты  $x$  и  $z=z(x)$  антенны при отсутствии погрешностей измерений соответствуют уравнению окружности  $(x-X_{ц})^2+(z-Z_{ц})^2=R^2$ . Параметрическая форма этого уравнения имеет вид  $x=X_{ц}+R\sin(\alpha-\alpha_0)$ ,  $z=Z_{ц}+R\cos(\alpha-\alpha_0)$ , где  $\alpha=\alpha(t)$  - угол реального крена,  $\alpha_0$  – угол между осью аппликата и прямой, проходящей через точки центра масс и антенны. Угол крена можно аппроксимировать синусоидой  $\alpha=\alpha(t)=\alpha_{mx}\sin\Omega t$ , где  $\Omega=2\pi/T$ , а  $T$  – период качки (изменения крена). Наибольшая скорость изменения крена наблюдается при малых его значениях, а наиболее медленная – при максимальном крене. Более общий случай бортовой качки, когда ось вращения судна и ось ординат не параллельны, рассмотрен в п.4.

## **2. Алгоритм Н. А. Иванова для определения оси и центра плоской круговой пространственной траектории ( не менее чем по трем точкам этой траектории)**

Первый значимый результат трудоемких совместных поисков получен Н. А. Ивановым, выявившим принципиально важный и простой метод построения нового алгоритма решения задач, поставленных в работах [1, 2] для общего случая расположения оси вращения в пространстве. При этом для будущего поколения СРНС с увеличенной на порядок точностью фазовых измерений местоположения приемной антенны (до  $\sigma_A \approx 0,4$  мм) при соответствующем увеличении номинала несущей) этот метод не потребует заметного увеличения объема статистической обработки. Базируется он, по существу, на известном из древности приеме определения центра окружности с помощью циркуля и линейки:

2.1. Пусть в три момента времени  $t_k$  аппаратура потребителя выдает оценки координат  $(x_k, y_k, z_k)$ ,  $k = -1, 0, +1$  трех точек  $P_{-1}, P_0, P_{+1}$  плоской окружности постоянного искомого радиуса  $R$ .

2.1.1. «Проведем» хорды - направленные отрезки  $P_{-1}P_0$  и  $P_0P_{+1}$ , т.е. векторы хорд с проекциями  $(x_0-x_{-1}), (y_0-y_{-1}), (z_0-z_{-1})$  и  $(x_0-x_{+1}), (y_0-y_{+1}), (z_0-z_{+1})$ . Координаты средних точек  $(x_{-c}, y_{-c}, z_{-c})$  и  $(x_{+c}, y_{+c}, z_{+c})$  хорд равны полусумме координат граничных точек, например:

$$x_{-c}=(x_0+x_{-1})/2, y_{-c}=(y_0+y_{-1})/2, z_{-c}=(z_0+z_{-1})/2, x_{+c}=(x_0+x_{+1})/2 \text{ и т.д.}$$

Через средние точки «проводятся» плоскости, перпендикулярные хорде. Уравнения таких плоскостей выражаются ([3] п.3.2-1b3) равной нулю суммой произведений проекций вектора хорды на разности проекций текущей и средней точек:

$$\begin{aligned} (x_0-x_{-1})(x-x_{-c})+(y_0-y_{-1})(y-y_{-c})+(z_0-z_{-1})(z-z_{-c})=0, \\ (x_0-x_{+1})(x-x_{+c})+(y_0-y_{+1})(y-y_{+c})+(z_0-z_{+1})(z-z_{+c})=0, \end{aligned}$$

или:

$$x^2(x_0-x_{-1})+y^2(y_0-y_{-1})+z^2(z_0-z_{-1})-x_0^2-y_0^2-z_0^2+x_{-1}^2+y_{-1}^2+z_{-1}^2=0 \quad (1)$$

$$x^2(x_0-x_{+1})+y^2(y_0-y_{+1})+z^2(z_0-z_{+1})-x_0^2-y_0^2-z_0^2+x_{+1}^2+y_{+1}^2+z_{+1}^2=0 \quad (2)$$

Первые три коэффициента уравнений (1) и (2), переписанных в общем виде  $x_{A_{-1}}+y_{B_{-1}}+z_{C_{-1}}+D_{-1}=0$ ,  $x_{A_{+1}}+y_{B_{+1}}+z_{C_{+1}}+D_{+1}=0$ , превышают вдвое проекции вектора хорд. Эти две плоскости определяют прямую линию их пересечения, проходящую через центр окружности по нормали, пропорциональной векторному произведению двух векторов с проекциями  $(A_{-1}, B_{-1}, C_{-1})$  и  $(A_{+1}, B_{+1}, C_{+1})$ , Это и есть ось вращения корпуса судна, ранее определявшаяся более сложно [1, 2].

2.1.2. Уравнение плоскости окружности может (однозначно при отсутствии погрешностей измерений) определяться, например, как включающая три заданных точки концов двух хорд. Пусть полученное, например с помощью формул из п.3.2.1b4 [3], уравнение общего вида имеет обозначенные нулевым индексом коэффициенты

$$A_0x+B_0y+C_0z+D_0=0 \quad (3)$$

Вместо (3) плоскость окружности можно в принципе определить и по одной или по всем местоопределяемым точкам траектории.

2.1.3. Точка, удовлетворяющая уравнениям (1), (2), (3), т.е. точка пересечения плоскостей

$$A_{-1}+y_{B_{-1}}+z_{C_{-1}}+D_{-1}=0, x_{A_{+1}}+y_{B_{+1}}+z_{C_{+1}}+D_{+1}=0, A_0x+B_0y+C_0z+D_0=0,$$

и есть центр окружности. Главный и частные определители такой системы легко определяются ([3], 3.4-5d).

2.2. Не представляет принципиальных трудностей построение вспомогательной ортогональной системы координат, где ось вращения будет совпадать с новой ординатой, а плоскость окружности содержать оси абсцисс и аппликата. Тогда математическое описание и оценка точности процессов определения места ЦМ в общем случае смешанной качки должны быть подобны описанию и оценке точности при бортовой качке (когда плоскость окружности параллельна поперечной плоскости судна).

Точность любого из обсуждаемых в статье методов удобно характеризовать отношением  $\Gamma_{ЦА}=\sigma_{Ц}/\sigma_{А}$  среднеквадратических погрешностей (СКП) определений мест точки ЦМ ( $\sigma_{Ц}$ ) и точки закрепления каждой приемной антенны ( $\sigma_{А}$ ). В существующем поколении СРНС последняя величина составляет око-

ло 0,4 см. Первые ориентировочные количественные оценки показали, что при использовании трех точек траектории с разносом  $15^0$  и  $15^0$  значение  $\Gamma_{ЦА} = \sigma_{Ц} / \sigma_{А}$  составляет в поперечной плоскости судна около 2 и примерно 16 по высоте. Использование статистической обработки ансамбля таких независимых измерений позволяет уменьшить погрешности почти на порядок. К сожалению, применение метода наименьших квадратов (МНК) здесь осложняется необходимостью учета коррелированности результатов измерений, получаемых по не полностью различающимся тройкам местоопределяемых точек траектории.

### 3. МНК-алгоритм определения уравнения плоскости, в которой находятся точки траектории перемещения антенны

Алгоритм оценки положения центра масс ЦМ и оси вращения ОВ может начинаться функционировать после выработки соответствующей команды в алгоритме непрерывного поиска подходящих отрезков траекторий перемещения приемной антенны.

Возможные вариации формулировки задачи для алгоритма поиска: 1) найти уравнение плоскости, минимально отклоняющейся от множества всех  $m$  местоопределенных текущих точек траектории движения антенн; 2) «проекти» плоскость, которая была бы минимально отклонена от ансамбля всех  $m$  местоопределенных точек траектории антенны за временной интервал, равный нескольким периодам  $T$  идеальной бортовой качки (или части такого периода  $T$  более сложного вида качки).

Казалось бы, здесь алгоритм МНК можно построить на базе нормального уравнения плоскости  $x_k c_x + y_k c_y + z_k c_z - p = 0$ . Из-за погрешностей измерений координаты  $x_k, y_k, z_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) могут не удовлетворять уравнению. Левая часть уравнения будет отлична от нуля, она выражает отклонение (расстояние от плоскости)  $\varepsilon_k = \Delta p_k$  одной из  $m$  точек. Сумма квадратов этих отклонений (т.е. МНК-функционал) зависит от четырех искомых параметров искомой плоскости

$$L = \sum \varepsilon_k^2 = \sum (x_k c_x + y_k c_y + z_k c_z - p)^2 = L(c_x, c_y, c_z, p).$$

Однако определить эти параметры нельзя, так как линейная система уравнений, получаемых приравниванием нулю частных производных от функционала по искомым четырем параметрам  $c_x, c_y, c_z, p$ , оказывается однородной. Можно усложнить задачу использованием множителей Лагранжа. Поэтому проще учесть известный опыт построения и решения задач МНК на плоскости, где вместо уравнения прямой  $x c_x + y c_y - p = 0$  используют общее уравнение  $Ax + By + C = 0$ , приведенное к форме  $y = kx + b$  путем деления на заведомо неравную нулю величину  $B$ . Таким образом, и в нашем случае следует использовать уравнение плоскости в форме:  $y - Ax - Bz - D = 0$ .

Соответствующий МНК функционал  $L = \sum (y_k - Ax_k - Bz_k - D)^2$  после приравнивания нулю частных производных от  $L$  по искомым параметрам  $A, B, D$  приводит к системе трех линейных уравнений:

$$\begin{aligned} \underline{A} \sum x_k^2 + \underline{B} \sum x_k z_k + \underline{D} \sum x_k &= \sum x_k y_k, \\ \underline{A} \sum x_k z_k + \underline{B} \sum z_k^2 + \underline{D} \sum z_k &= \sum y_k z_k, \\ \underline{A} \sum x_k + \underline{B} \sum z_k + \underline{D} m &= \sum y_k. \end{aligned}$$

Следует учитывать, что уменьшить объем вычислений в МНК можно при использовании рекуррентных процедур.

Этот алгоритм позволяет определить направление оси вращения судна не по трем как в п. 2, а по всем местоопределенным точкам траектории антенны. Вместо упоминаемой в п. 2.1.2 плоскости можно использовать плоскость, найденную по МНК.

При выработке команды о появлении приемлемого ансамбля местоопределенных  $m$  точек траектории антенны, по-видимому, целесообразно будет использовать критерий, связанный со среднеквадратической величиной отклонения плоскости от ансамбля этих точек и равной  $\underline{\varepsilon} = (\sum \varepsilon_k^2)^{0.5} / m^{0.5} = (L/m)^{0.5}$ , причем значение  $L = \sum (y_k - \underline{A}x_k - \underline{B}z_k - \underline{D})^2$  выражается через использованные при вычислении коэффициентов  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{D}$  суммы:

$$L = m\underline{D}^2 + \sum [y_k^2 + \underline{A}^2 x_k^2 + \underline{B}^2 z_k^2 + 2(\underline{A}\underline{B}x_k z_k + \underline{A}\underline{D}x_k + \underline{B}\underline{D}z_k - \underline{A}x_k y_k - \underline{B}y_k z_k - \underline{D}y_k)].$$

Распределение вероятности значений отклонений  $\varepsilon$  по множеству отдельных ансамблей относительно  $\underline{\varepsilon}$  полагается известным. Приведенные соотношения позволяют выполнить анализ и моделирование влияния ненулевого значения  $\varepsilon$  на точность вычисления координат ЦМ. При математическом моделировании можно обозначить нижним нулевым индексом коэффициенты  $\underline{A}_0$ ,  $\underline{B}_0$ ,  $\underline{D}_0$ , соответствующие истинной плоскости с  $\varepsilon=0$ . Коэффициенты без нулевых индексов равны сумме истинных коэффициентов с соответственно  $\Delta A$ ,  $\Delta B$ ,  $\Delta D$ , которые и вызывают отклонение  $\varepsilon$ . Заслуживает отдельного анализа вопрос связи этого отклонения с численными значениями геометрических характеристик плоскости. Эти характеристики, как отмечалось, проще всего явно представить по нормальному уравнению плоскости, переход к которому легко осуществить, так как из равенств  $\underline{A} = -c_x/c_y$ ,  $\underline{B} = -c_z/c_y$ ,  $\underline{D} = r/c_y$  и  $c_x^2 + c_y^2 + c_z^2 = 1$ , вытекает  $c_x = -\underline{A}c_y$ ,  $c_z = -\underline{B}c_y$ , и из  $c_x^2 + c_y^2 + c_z^2 = 1$  следует  $c_y^2 = 1/(\underline{A}^2 + \underline{B}^2 + 1)$ , причем  $r = \underline{D}c_y$ .

#### 4. МНК-алгоритм определения ЦМ по уравнению сферы, центр которой совпадает с центром круговой траектории антенны

Если при бортовой качке ось вращения судна и ось ординат не параллельны, то текущие мгновенные горизонтные координаты  $(x_k, y_k, z_k)$  движущихся точек траекторий приемной антенны при отсутствии погрешностей измерений должны соответствовать множеству точек участка поверхности сферы с текущими мгновенными значениями координат  $(X_{Ц}, Y_{Ц}, Z_{Ц})$  центра масс. Уравнение сферы  $(x_k - X_{Ц})^2 + (y_k - Y_{Ц})^2 + (z_k - Z_{Ц})^2 = R^2$ , где  $R^2 = (a_A - a_{Ц})^2 + (b_A - b_{Ц})^2 + (h_A - h_{Ц})^2$ .

В векторной форме это уравнение имеет вид  $(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{Ц}, \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{Ц}) = R^2$ , где два радиуса-вектора  $\mathbf{r}_k$  и  $\mathbf{r}_{Ц}$  направлены из начальной точки горизонтной системы соответственно в текущую точку поверхности сферы и точку ЦМ центра масс. Квадраты модулей этих векторов равны  $r_k^2 = x_k^2 + y_k^2 + z_k^2$  и  $r_{Ц}^2 = X_{Ц}^2 + Y_{Ц}^2 + Z_{Ц}^2$ .

Аппаратура потребителя в  $m$  моментов времени  $t_k$  выдает оценки координат точек, которые лишь без погрешностей измерений удовлетворяют уравнению сферы. Из-за погрешностей получается система  $m$  несовместных нелинейных уравнений

$$(x_k - X_{Ц})^2 + (y_k - Y_{Ц})^2 + (z_k - Z_{Ц})^2 - R^2 = \varepsilon_k,$$



где  $\varepsilon_k$  – так называемая начальная погрешность. Исходный для МНК функционал как сумма квадратов  $\varepsilon_k^2$  равен

$$L=L(X_{\square}, Y_{\square}, Z_{\square}, R)=\sum \varepsilon_k^2 =\sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k -R^2+ r_{\square}^2)^2.$$

Приравнивая нулю частные производные от L по искомым параметрам, получим систему четырех уравнений:

$$\sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k -R^2+ r_{\square}^2) (x_k-X_{\square})=0 \quad (4)$$

$$\sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k -R^2+ r_{\square}^2)(y_k-Y_{\square})=0 \quad (5)$$

$$\sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k -R^2+ r_{\square}^2) (z_k-Z_{\square})=0 \quad (6)$$

$$\sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k -R^2+ r_{\square}^2)=0 \quad (7)$$

Благодаря тому, что из (7) оценка  $R^2$  выражается явно через  $X_{\square}, Y_{\square}, Z_{\square}$  как

$$R^2= r_{\square}^2+m^{-1} \sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k), \text{ где } r_{\square}^2= X_{\square}^2+Y_{\square}^2+Z_{\square}^2, \quad (8)$$

легко привести предыдущие уравнения к системе трех линейных уравнений.

Обозначим математические ожидания измеренных координат

$$M_x= m^{-1}\sum x_k, M_y=m^{-1}\sum y_k, M_z=m^{-1}\sum z_k. \quad (9)$$

Первое уравнение (4) перепишем как

$$\sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k-R^2+r_{\square}^2)x_k -X_{\square}\sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k-R^2+r_{\square}^2).$$

Здесь последняя сумма (на основании (7)) равна нулю, а первую сумму с учетом (8) перепишем как

$$\sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k)x_k -\sum x_k m^{-1}\sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k)=0.$$

Используя (9), получаем  $\sum (r_k^2-2X_{\square}x_k-2Y_{\square}y_k-2Z_{\square}z_k)(x_k-M_x)=0$ . После аналогичных преобразований уравнений (5) и (6) перепишем (4), (5), (6) в виде:

$$2X_{\square} \sum (x_k -M_x)x_k-2Y_{\square} \sum y_k(x_k-M_x)-2Z_{\square} \sum (x_k -M_x)z_k =\sum r_k^2(x_k -M_x) \quad (10)$$

$$2X_{\square} \sum (y_k -M_y)x_k-2Y_{\square} \sum y_k(y_k-M_y)-2Z_{\square} \sum (y_k -M_y)z_k =\sum r_k^2(y_k -M_y) \quad (11)$$

$$2X_{\square} \sum (z_k -M_z)x_k-2Y_{\square} \sum y_k(z_k-M_z)-2Z_{\square} \sum (z_k -M_z)z_k =\sum r_k^2(z_k -M_z) \quad (12)$$

Полученная линейная система трех уравнений определяет оценки искоемых трех координат  $X_{\square}, Y_{\square}, Z_{\square}$  центра вращения антенны, а также по (7) и четвертый параметр. Этому решению соответствует точка, отстоящая от наиболее вероятной плоскости круговой орбиты, найденной по МНК в предыдущем пункте, на кратчайшее расстояние, которое находится по известным правилам с использованием нормального уравнения плоскости. Возникает вопрос: можно ли при таком отклонении оценок продолжать расчеты в реальном приборе? Для ответа необходим критерий, который должен быть обоснован результатами соответствующих теоретических и экспериментальных исследований.

Если на ровной воде окажется приемлемой модель идеальной бортовой качки, когда ось вращения и ось ординат параллельны, можно ограничиться рассмотрением проекции траектории на поперечную плоскость. Останутся два уравнения:

$$2X_{\square} \sum (x_k -M_x)x_k-2Z_{\square} \sum (x_k -M_x)z_k =\sum (x_k^2+z_k^2)(x_k -M_x)$$

$$2X_{\square} \sum (z_k -M_z)x_k-2Z_{\square} \sum (z_k -M_z)z_k =\sum (x_k^2+z_k^2)(z_k -M_z).$$

## 5. Трудности и перспективы решения возникающих проблем

Научно-технические проблемы создания измерителя положения оси вращения и центра масс судна могут быть выявлены в процессе выполнения достаточно трудоемкой и продолжительной НИР, требующей соответствующих инвестиций. На первом этапе НИР главное внимание должно быть уде-

лено радионавигационным аспектам задачи, их формулировке и способам решения. На последующих этапах должны быть исследованы аспекты безопасности движения судна, и, следовательно, возрастет роль специалистов по теории устройства судна. Примерные основные этапы НИР.

- Отработка, моделирование на ЭВМ и обоснование оптимального алгоритма определения положения оси вращения и центра масс по ограниченному и значительному количеству полученных аппаратурой потребителя СРНС точек траектории антенны в простейших случаях перемещений судна с выключенными движителями (на моделях идеальной бортовой и килевой качек). Оценка достижимой точности определений местоположения оси вращения и центра масс на простейших моделях перемещений судна.
- Исследование и оценка путей и алгоритмов определения оси вращения и центра масс судна при различных видах движения судна и ориентации корпуса относительно волнения моря. На этом этапе существенно возрастет роль специалистов в области теории судна.
- Предварительный анализ направлений модернизации аппаратуры потребителей. На этом этапе НИР привлекаются представители внешних организаций, которые могут быть потенциальными заказчиками или разработчиками ОКР. Будет наиболее приемлема аппаратура потребителей с двумя – тремя малобазисными интерферометрами. Такая аппаратура выпускается, например, зарубежными фирмами "Аштек", "Тримбл", "Фуруно". Основным объектом модернизации явится программно-алгоритмическое обеспечение в соответствии с результатами НИР. Таким образом, структура АП должна включать как все блоки интерферометрического измерителя угловой пространственной ориентации, так и устройство статистического анализа ансамбля точек траектории перемещения приемных антенн с выработкой информации о положении центра масс и ориентации оси вращения судна в форме, удобной потребителю.

В процессе проведения исследовательских судостроительных работ может возникнуть потребность в более точных результатах, достижимых при увеличении разноса приемных антенн. Возможно, здесь после соответствующей модернизации программного обеспечения окажется пригодной аппаратура, применяемая сейчас для геодезических работ и изготавливаемая в РИРВ.

#### **6. Заключительные замечания**

Кроме изложенных в настоящей статье алгоритмов, были получены и другие варианты подходов к определению оси вращения и центра масс. Один из алгоритмов с оценкой длин отрезков двух траекторий (антенны и начальной точки судовой системы координат) отражен в работах [5, 6]. Для объективного сравнения описанных алгоритмов и тех, которые пока еще не созданы, необходимы, как указано выше, соответствующие исследования более широкого круга исполнителей. До появления таких возможностей авторы статьи будут признательны за советы и замечания, которые учтут в последующих публикациях.

Авторы выражают благодарность Н. С. Зимину и Ю. М. Устинову за полезные советы при подготовке настоящей статьи.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Никитенко Ю. И. Возможности определения положения оси вращения судна по фазе сигналов СРНС // Проблемы развития морского флота. Сб. науч. тр. ЦНИИМФ. СПб. – 1999. — С.161–166.
2. Никитенко Ю. И. Расширение круга навигационно-динамических параметров, оцениваемых по фазе сигналов спутниковых РНС. // Навигация и гидрография. – 2000. – № 10 . – С. 85–92.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука . – 1984. – 831 с.
4. Кацман Ф. М., Дорогостайский Д. В., Коннов А. В., Коваленко Б. П. Теория и устройство судов. Л.: Судостроение, 1991.
5. Никитенко Ю. И. Иванов Н. А. Принципы извлечения информации о векторе положения судна в спутниковых РНС. Учебное пособие. СПб.: ГМА ( в печати).
6. Никитенко Ю. И. Принципы определения на судне центра масс по спутниковым РНС. В наст. изд.. – С. 86-90.

---

# СРЕДСТВА НАВИГАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ МОРЕПЛАВАНИЯ, ВОЗДУШНЫХ ТРАСС И ПОРТОВ

---

ГРНТИ 45.51.29

## НОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА ДЛЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ СНО

Г. А. КАЛОШИН  
А. Н. МАЛЬЦЕВ  
(ИОА СО РАН)

*Рассматриваются современные источники света (ИС): светодиоды, лазерные диоды, твердотельные лазеры с диодной накачкой, полупроводниковые лазеры с электронной накачкой. Обосновываются требования и обсуждаются факторы, влияющие на использование ИС в зрительных навигационных устройствах. В связи с возможностью широкого применения современных ИС в зрительных средствах навигационного оборудования (СНО) обсуждаются такие их характеристики как спектральный состав, выходная мощность и расходимость излучения, стабильность и ресурс работы, другие эксплуатационные параметры. Анализируются возможные пути совершенствования и улучшения параметров зрительных СНО с использованием ИС. Сделан вывод о перспективности использования современных ИС в зрительных СНО.*

**Введение.** Бурное развитие оптоэлектроники и фотоники в последние годы обусловило появление новых высоконадежных, экономичных и относительно дешевых твердотельных источников света, работающих во всей видимой и ближней ИК областях спектра. Среди них – светодиоды (СД), лазерные диоды (ЛД), твердотельные лазеры с диодной накачкой (ТЛДН), в том числе на микрочипах (ТЛМ), и полупроводниковые лазеры с электронной накачкой (ПЛЭН), нетрадиционные для применения в зрительных навигационных системах.

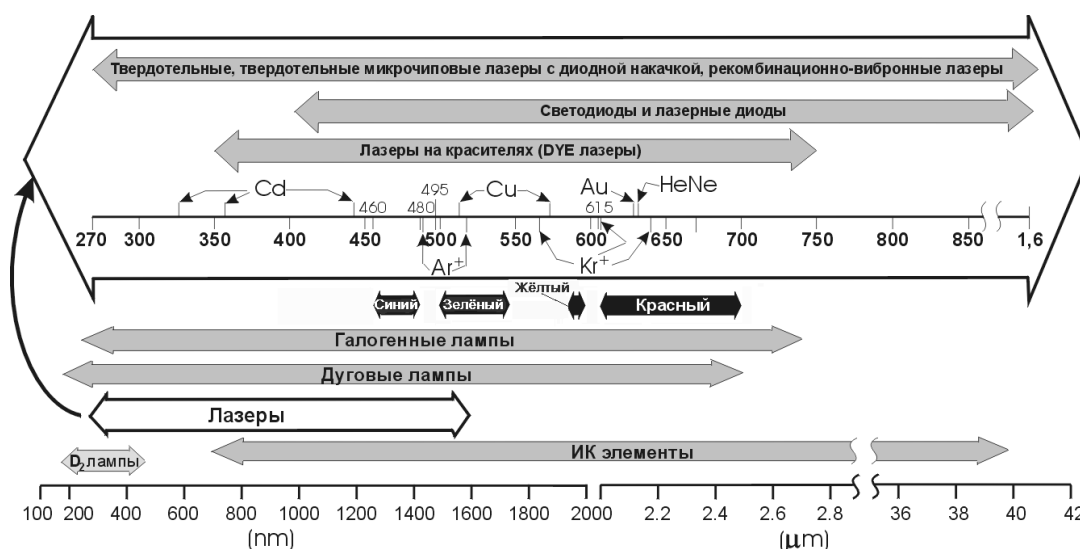
За рубежом во многих областях применения ЛД и ТЛДН рассматриваются как альтернатива He-Ne, ионным (Ar, Kr) и лазерам на парах металлов (Cd, Cu, Au), а СД заменяют лампы накаливания и люминесцентным лампы (см. рисунок).

Так, в Японии осуществляется национальная программа «Свет в XXI веке» [1, 2]. В США выпускаются автомобили с внутренним и наружным сигнальным освещением на основе СД, причем в ближайшие пять лет предполагается замена ламп наружного освещения на СД с большой осевой силой света. Транснациональная компания «Pharos Marine» – мировой лидер по разработкам и продажам средств навигационного оборудования (СНО) с

1998 г. выпускает светооптические аппараты типа LED-85 на основе матриц со 120-элементными СД. В настоящее время выпускается усовершенствованный вариант LED-85/P [3]. Светооптические аппараты на основе LED также выпускаются «LEDTRONICS, INC» [4].

Среди отечественных производителей СД наиболее активно участвует в создании различного рода светосигнальной техники ЗАО «Корвет-Лайтс» (г. Москва) [5, 6]. В частности, фирма успешно разрабатывает источники света на основе СД для береговых и плавучих СНО типа ФЭН-140 и ФЭН-210. ГУП «НИИ ПП» (г. Томск) с 1999 г. выпускает полупроводниковые сигнальные лампы для речных бакенов [7, 8]. В работах [9, 10] впервые в отечественной литературе упоминается о возможности использования СД в СНО.

7-10 мая 2001 МАМС провел заседание рабочей группы в г. Кобленц (Германия) [11], где основными темами являлись: разработка стандартов для фотометрии зрительных СНО; разработка рекомендаций для новых источников света, включая LED и ЛД; лазерные створные огни и развитие источников питания. Предполагается, что работа в перечисленных направлениях должна осуществляться под знаком увеличения эффективности и уменьшения стоимости.



**Спектр излучения источников света**

Вышеизложенное побудило авторов провести анализ перспективности для СНО новых поколений источников света, которые имеются в настоящее время на мировом рынке или могут появиться в ближайшее время. Основной акцент в нем сделан на ИС для лазерных СНО, у которых использование лазеров с низкими эксплуатационными характеристиками являлось одним из препятствий на пути их продвижения на рынок [12]. Результаты анализа содер­жатся в приводимом ниже обзоре.

При выборе ИС обычно принимают во внимание эксплуатационные и экономические соображения, учитывая, что в видимой области спектра отсутствует селективное ослабление на каких-либо отдельно взятых длинах волн.

**Необходимые характеристики ИС.** О каких характеристиках идет речь, когда говорят об ИС при решении навигационных задач зрительными и, в частности, лазерными СНО?

Следуя рекомендациями ИНО-89 [13, 14] и МАМС [15], основными параметрами лазеров, которые могут быть использованы для лазерных створов, являются следующие: цветовые характеристики, выходная мощность излучения и диаграмма направленности.

Цветовые характеристики огней должны соответствовать следующим интервалам длин волн (см. рис.): красного –  $\Delta\lambda = 615 - 700$  нм; желтого –  $\Delta\lambda = 585 - 595$  нм; зеленого –  $\Delta\lambda = 495 - 545$  нм; синего  $\Delta\lambda = 460 - 480$  нм. Отметим, что цвета – оранжевый, желто-зеленый и синий менее выгодны для сигнальных огней. Первые два по причине значительного ахроматического интервала, максимальное значение которого находится на  $\lambda = 560$  нм, а последний – по причине низкой пороговой чувствительности зрения.

Стремление увеличить предельную дальность обнаружения ( $L_{\text{пред}}$ ), при соблюдении норм лазерной безопасности (особенно в условиях пониженной видимости в атмосфере) предполагает, что в зависимости от требуемой  $L_{\text{пред}}$  диапазон выходной мощности может изменяться от 5 мВт до 1 Вт, а расходимость излучения – от  $6 \times 10^{-4}$  до  $3 \times 10^{-3}$  рад.

Не менее важны и другие характеристики:

- стабильность выходной мощности излучения, которая должна быть существенно меньше флуктуаций интенсивности на турбулентных неоднородностях показателя преломления атмосферного воздуха и не должна превышать 5 - 7 % в течение 8 часов работы;
- стабильность оси диаграммы направленности должна составлять  $(3-5) \times 10^{-5}$  рад при требованиях к погрешности задания границ секторов в пределах  $\pm 3 \times 10^{-4}$  рад на уровне  $3\sigma$ ;
- гарантированный срок работы (наработка на отказ) должен соответствовать, по крайней мере, сезонной продолжительности навигации в прибрежной зоне и составлять не менее 5000 часов;
- режим работы предпочтителен непрерывный, при импульсно-периодическом - необходима высокая частота повторения импульсов в пределах 50 - 100 кГц в зависимости от решаемых задач.

Другие, так же важные эксплуатационные параметры ИС в СНО должны быть по возможности минимальными, среди них:

- стоимость, которая, в большинстве подобных устройств согласно сложившейся практике обычно составляет половину стоимости СНО;
- весогабаритные характеристики;
- время включения, после которого гарантируются выходные параметры;
- повторяемость параметров устройства при замене ИС;
- устойчивость к механическим воздействиям, к воздействиям электростатических полей и т.п. Кроме того, вышеперечисленные параметры должны обеспечиваться при изменениях окружающей среды (температуры, влажности и агрессивных воздействий).

Среди чрезвычайно широкой номенклатуры ИС, существующих в настоящее время, наиболее привлекательными для применения в зрительных

СНО, с позиций предъявляемых требований, являются следующие нетрадиционные источники<sup>\*</sup>: СД – Light Emitted Diodes (LED); ЛД – Laser Diodes; ТЛДН и ТЛМ – Diode-Pumped Solid-State Microchip Laser (DPSSM Lasers), импульсные и сканирующие ПЛЭН и в отдаленной перспективе - рекомбинационные вибронные лазеры (РВЛ). Также в ряде случаев возможно применение в зрительных СНО классических He-Ne и твердотельных лазеров с усовершенствованными параметрами.

**1. СД - LED** [1, 2, 16]. Диапазон излучения современных СД занимает область спектра от ближней ИК до синей, в том числе они могут излучать квазибелый свет. Величина светового потока одноэлементных СД в белом свете превышает 400 лм, по сравнению с 900 лм от обычной лампы накаливания. Световой поток СД стремительно растет. В работе [17] сообщается о новой Атон-технологии, разработанной фирмой «Osram Opto Semiconductors GmbH & Co. OHG» и названной так по имени древнеегипетского бога Солнца. За счет оптимизации геометрии кристалла технология эта позволяет получить максимальную силу света, превышающую в настоящее время 1000 кд. Квантовая эффективность указанных СД составляет 50 %, в то время как у традиционных ИС она в десять раз меньше. Гарантированный ресурс составляет ≈ 50-100 тысяч часов, что сопоставимо со сроками морального старения потребительских качеств СНО.

Основными зарубежными производителями мощных СД видимого диапазона спектра, согласно Buyers Guides, являются «Coherent, Inc.», «Spectra-Physics Semiconductor Lasers», «Melles Griot», «SDL, Inc», «Semiconductor Laser International Corp.», «Industrial Microphotonics Company», «High Power Devices» (USA), «Hamamatsu» (Japan), «Laser 2000 SA» (France), «Jenoptik Laserdiode GmbH», «Laser Graphics» (Germany) и др.

Наиболее известными отечественными производителями дешевых и надежных СД являются «Корвет-Лайтс» [5, 6] и ГУП «НИИ ПП» [7]. Последний выпускает полупроводниковые сигнальные лампы типа ЛПРК-01, ЛПРЖ-02 с осевой силой света 300 и 250 лм в красной и желтой областях спектра соответственно. Средняя стоимость ламп составляет 200 руб., а высокоинтенсивных сигнальных устройств для высотных сооружений – 3 – 4 тыс. руб. «Корвет-Лайтс» выпускает светодиодные красные и зеленые источники света (СИС) типа ДЛК-К633-8/2-20/60 и ДЛК-Л526-20/4-20/60 с силой света 8 и 20 кд в горизонтальной плоскости соответственно. Стоимость СИС около 1,5 тыс. руб. Установка СИС на навигационном знаке совместно с литиевыми источниками тока (ИТ) [18] типа ИТ «Буй 3А», ИТ «Знак-2Л», ИТ «Тритон» позволяет обеспечить автономную эксплуатацию в течение 5 лет.

В России СД производятся также на предприятиях «Сапфир» и «Оптрон» (г. Москва). Наиболее полная информация о номенклатуре отечественных производителей содержится в ежегодно обновляемых каталогах - справочниках Лазерной ассоциации [19].

---

<sup>\*</sup> В сообщении не рассматриваются традиционные ИС в виде ламп накаливания, люминесцентных, кварцевых и галогенных ламп, устанавливаемых в фокусах матриц из параболических зеркал, ксеноновых, дуговых ламп, натриевых ламп низкого давления, высокого давления и т.д.

**2. He - Ne лазеры** [20]. Данный класс лазеров представляет собой отработанную технологию и используется главным образом по причине превосходства параметров лазерного пучка, стабильности выходной мощности излучения и минимального времени включения. Стоимость зарубежных образцов для выходной мощности на уровне нескольких мВт не превышает \$1,000, а для выходной мощности 35 мВт в среднем составляет около \$4,500. Срок службы коммерческих образцов составляет 30 000 час.

**3. Ионные лазеры с воздушным охлаждением на ионах Ar и Kr** [21]. Генерируют на длинах волн 514; 488<sup>\*</sup>; 647; 568<sup>\*</sup> нм соответственно. Комбинация двух газов дает квазибелый цвет при одновременной генерации на всех линиях. К недостаткам этих лазеров следует отнести значительное энергопотребление  $\approx 1$  кВт и, следовательно, необходимость отвода тепла. Для лазеров с мощностью до 1 Вт наработка на отказ, в зависимости от типа и производителя, колеблется в пределах 5000 – 10 000 час. Стоимость до \$5000. Основные производители находятся за рубежом.

**4. Лазеры на парах металлов (ЛПМ): Cu, Au и Cd с буферным газом He** [22]. Генерируют на длинах волн  $\lambda = 510; 578^*; 627,8$  и  $442^*; 325^*; 354^*$  нм соответственно. Коммерческие образцы ЛПМ на парах Cu и Au серии «Кулон» и «Кристалл» производства ГНПП «Исток» (г. Фрязино) имеют гарантированный срок службы 1000 и 500 час. соответственно. Стоимость лазера с такими активными элементами при изготовлении в России составляет не менее \$5000 и \$7500 и более соответственно. Частота следования импульсов равна 8 – 18 кГц, что значительно ограничивает область применения в лазерных навигационных устройствах. Экспериментальные образцы активных элементов на бромиде меди и золоте имеют реальный срок службы не более 500 часов. Кроме того, имеются ограничения на размещение, например, в вертикальном положении. Потребляемая мощность в зависимости от типа составляет от 0,65 до 3,8 кВт. Соответственно возникает проблема отвода тепла. Помимо этого, требуется дополнительная энергия и время (от 0,5 до 1 часа) на разогрев активной среды, после чего гарантируются выходные параметры. Это также ограничивает применение ЛПМ в автономных комплексах. Выходная мощность стабилизируется обычно на уровне до 5 %, стабильность оси диаграммы направленности (ОДН) сильно зависит от температуры окружающей среды и в реальных условиях может быть существенно хуже необходимых  $(3-5) \cdot 10^{-5}$  рад.

Этот тип лазеров можно рекомендовать для демонстрационных целей.

**5. Лазерные диоды (ЛД)** [23-26]. Малые размеры и высокая квантовая эффективность ЛД, широкий диапазон генерируемых мощностей от нескольких мВт до нескольких Вт, высокая надежность позволяют рассматривать мощные ЛД как альтернативу газовым лазерам. Отметим, что содержание термина "мощные ЛД" существенно менялось за последние 15 лет. Какое-то время ими считались 20 мВт ЛД, в настоящее время – ЛД с  $P_{\text{вых}}$  не менее чем 100 мВт в одномодовом режиме и – 1-10 Вт в многомодовом.

Номенклатура мирового рынка ЛД чрезвычайно разнообразна как по выходным параметрам, так и по производителям.

<sup>\*</sup> здесь и далее по тексту означает, что данные длины волн не попадают в требуемый спектральный диапазон длин волн



В настоящее время нашей промышленностью (ГП «НИИ "Полюс"» (г. Москва), КБ «Восход» (г. Калуга), ГУНПП «Инжект» (г. Саратов) и др.) освоены инжекционные диодные лазеры мощностью до 5 мВт, излучающие на длине волны  $\lambda = 635$  нм, с потребляемой мощностью менее 0,5 Вт. Следует отметить, что инжекционные диодные лазеры имеют встроенный фотодиод для контроля, стабилизации и управления мощностью излучения. Обеспечивается электронное ослабление в 5-10 раз мощности излучения и ее нестабильности на каждом уровне не более 0,5 %. Конструктивно лазер выглядит как цилиндр диаметром 1 см, высотой 5 см и массой не более 100 г.

За рубежом наибольших успехов добились фирмы «SDL, Inc.» (USA) и «Laser Graphics» (Germany). Так, промышленный образец фирмы «SDL, Inc.» типа SDL - 7630 имеет  $\lambda = 650$  нм и  $P_{\text{вых}} = 0,5$  Вт.

Коллимация излучения ЛД с помощью высокоапертурного объектива позволяет получить расходимость излучения сопоставимую с He-Ne лазерами.

Несомненным достоинством этого класса лазеров является то, что выходная мощность  $P_{\text{вых}}$  ЛД увеличивается линейно с ростом рабочего тока  $I_{\text{рт}}$ :  $P_{\text{вых}} = (I_{\text{рт}} - I_{\text{пор}})\eta d$ , где  $\eta$  - дифференциальная квантовая эффективность, достигающая 90 %.

Однако ЛД также имеют недостатки, главные из которых являются продолжением их достоинств. В частности, малые (десятки мкм) размеры активного элемента и высокая квантовая эффективность рекомбинационных переходов приводят к высоким коэффициентам поглощения (до  $10^3$  см<sup>-1</sup>). Кроме того, необходимы высокие мощности накачки для образования инверсии на такого типа рекомбинационных переходах, при том что предельные токи уже достигнуты. Плотность мощности, выводимая через выходную поверхность, также зачастую превышает пороги лучевого разрушения материала и требует специальных мер. Именно в этом направлении был достигнут прогресс в ЛД последнего поколения с так называемыми вертикальными резонаторами и квантовыми ямами. Но принципиальные физические ограничения, о которых говорилось выше, остаются не снятыми. Второй путь получения больших мощностей лежит в комплексировании ЛД в виде двумерных структур (laser - diode arrays) длиной до 1 см и выходной мощностью до нескольких Вт, или блоков, называемых мощными решетками (high power arrays, bars) или «стеллажами» (stacks). В таких структурах мощность повышается до десятков Вт.

Стоимость таких систем составляет несколько тысяч долларов США.

Есть и другие недостатки ЛД, такие как относительно низкая  $P_{\text{вых}}$  в коротковолновой области спектра, необходимость термостабилизации с помощью термоэлектрических охладителей, повторяемость параметров при замене ЛД, относительно высокая чувствительность к электростатическим разрядам.

Тем не менее перечисленные недостатки не являются принципиальными и технически устранимы. Этот класс лазеров в тех областях, где не требуется высокое качество пучка и большие выходные мощности, вытесняет в настоящее время He-Ne и другие газовые лазеры. Вместе с тем, малые весогабаритные характеристики и энергопотребление делают их особенно предпочтительными при использования в лазерных СНО, в том числе и при создании СНО с автономными источниками питания.

**6. Твердотельные лазеры [20].** Твердотельные лазеры с оптической накачкой (Solid State Lasers – SSL) могут быть использованы в зрительных СНО. Последние достижения в области твердотельных лазеров с оптической накачкой излучением ЛД позволяют создавать лазеры с квазинепрерывным излучением, с частотой повторения импульсов достаточных для ряда типов СНО.

Производством таких отечественных лазеров занимается ГП «НИИ "Полюс"» и фирма «Лазер-компакт», которые в настоящее время разработали малогабаритный экспериментальный образец лазера с накачкой от решетки ЛД с мощностью излучения в зеленой области спектра в несколько ватт. В красной области спектра твердотельные лазеры с такими же параметрами в нашей стране не производятся.

За рубежом твердотельные лазеры производит ряд фирм. Длины волн генерации лежат в зеленом, в красном (рубин, сапфир с титаном, александрит) и ИК (стекла и кристаллы, легированные редкоземельными ионами) диапазоне спектра. При импульсно-периодическом режиме генерации с частотами до десятков и даже сотен килогерц средняя мощность ее достаточно эффективно может быть преобразована во вторую гармонику (обычно до 30-50%) с длиной волны, лежащей в зеленой или голубой области спектра.

Недостатками такого типа лазеров являются:

а) достаточно сложные и дорогие комплектующие (активные кристаллы, нелинейно-оптические кристаллы, связующие зеркала, линзы, призмы и т.п.), которые необходимы для получения видимого излучения;

б) недостаточный срок службы ламп-вспышек, которые до последнего времени применялись для накачки твердотельных лазеров. Использование диодной накачки для некоторых типов твердотельных лазеров привело к существенному увеличению ресурса (до нескольких тысяч часов), но применение диодной накачки для систем, работающих в полевых условиях в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды, приводит к усложнению и удорожанию систем термоконтроля. Общая стоимость такого рода лазеров обычно составляет несколько десятков тысяч долларов.

Весогабаритные характеристики таких лазеров существенно меньше, чем у газовых со сходными мощностями, но существенно больше, чем у одноэлементных ЛД.

**7. Твердотельные микрочиповые лазеры с диодной накачкой (Diode - Pumped Solid - State Microchip Laser - DPSSML) [22].** Работают как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах во всем видимом диапазоне спектра. DPSSML появились на рынке в начале 90-х гг. и первоначально казались полной альтернативой классическим газовым лазерам с их проблемами в юстировке, утечке газов из разрядных трубок и т.п. DPSSL являются как бы комбинацией качественного пучка газовых лазеров и малых размеров при большой эффективности и надежности диодных лазеров. Наряду с высокими качествами генерируемых пучков, надежностью, прочностью, малыми размерами, они имеют высокую стабильность выходной мощности (около 4 % за 8 час.), высокую стабильность ОДН ( $< 0,02$  мрад/°С). Все это позволяет считать их перспективными ИС для лазерных навигационных устройств.

К недостаткам можно отнести высокую стоимость, составляющую десятки тысяч долларов.

**8. Рекомбинационные вибронные лазеры (РВЛ) [27-29].** В более отдаленной перспективе просматривается эффективное применение для навигационных устройств нового типа лазеров – рекомбинационных вибронных лазеров (РВЛ). Последние являются твердотельными лазерами на микрокристаллах вибронного типа (типа сапфира с титаном), но не с оптической, а с электронной накачкой. РВЛ объединяют в себе преимущества твердотельных лазеров с оптической накачкой и инжекционных полупроводниковых лазеров, но лишены целого ряда свойственных им недостатков, о которых уже говорилось выше. Преимущества РВЛ заключаются в том, что они работают на рекомбинационных переходах, имеющих полосы излучения от УФ до ближней ИК области спектра 270 -1300 нм. При этом плотность мощности накачки РВЛ в десятки и сотни раз превышает таковую для DPSSML и может достигать величин, характерных для полупроводниковых лазеров. Размеры активного элемента РВЛ могут составлять миллиметры и менее. Однако в отличие от полупроводниковых лазеров, излучение рекомбинационных переходов, используемых в РВЛ, практически не поглощается в самом кристалле и уровень накачки можно плавно регулировать, а объем среды выбирать оптимальным для мощности и расходимости выходного лазерного пучка и т.п., что невозможно сделать в полупроводниковых лазерах.

**Заключение.** В настоящее время вопрос о возможности использования СД в СНО уже не стоит [30]. Первые, пока еще не совершенные ИС, составленные из одноэлементных СД, уже появились на рынке. Проблема состоит в другом. Одним из основных направлений в дизайне как зарубежных, так и отечественных ИС является взаимозаменяемость традиционных ламп и ламп на основе СД. Уже это накладывает определенные ограничения на однородность и величину светового потока лампы при необходимости обеспечения требуемого уровня. При этом поток не является равномерным как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, что в свою очередь приводит к разной  $L_{\text{пред}}$  в зависимости от угла наблюдения.

Одним из возможных решений «выравнивания» светового потока является использование многоэлементных ламп (Multi chip LED lamp), составленных из отдельных СД (Single chip LED) по так называемой схеме «Помашка». Так светооптические аппараты LED-85, 85/P [3] имеют лампы, составленные круговым размещением отдельных элементов по 12 шт в 4-е ряда со сдвигом на половину размера отдельного элемента в каждом ряду. Это решение выравнивает диаграмму в горизонтальной плоскости и частично в вертикальной. При этом получается лампа со 120 отдельными элементами с суммарным энергопотреблением 10/12 Вт. Ночная дальность видимости в зависимости от угла наблюдения для 10/12 Вт лампы с силой излучения 30 кд составляет: для красного и зеленого цветов 3,3 мили - в горизонтальной плоскости; 1,4 мили - при наблюдении под углом  $30^{\circ}$  от горизонтальной плоскости; 1 мили - под углом  $90^{\circ}$ . Аналогичное решение используется в лампах фирмы «LEDTRONICS, INC» [4].

Возможны и другие решения, например, лампа фирмы «Корвет-Лайтс» [31] формирует равномерный поток в горизонтальной плоскости, но в вертикальной он, по-видимому, будет убывать с увеличением угла. При этом сила света лампы составляет 30 кд.

На первый взгляд представляется, что такие матричные лампы, созданные по схеме «Ромашка», с позиций энергопотребления утрачивают свою привлекательность. Но при этом обеспечивается круговой характер огня, в том числе, и при наблюдении сверху. Кроме того, энергопотребление отечественных и зарубежных СД (отдельных элементов ламп) при равном световом потоке отличается.

Следует отметить, что цветные лампы на основе LED должны иметь чуть большую дальность видимости по сравнению с традиционными лампами при равных световых потоках. Согласно закону Гельмгольца-Кольрауша [32] насыщенность цвета влияет на его яркость. Чем ближе тестовое поле к монохроматическому, тем более ярким оно кажется, даже если освещенность сетчатки глаза при этом остается постоянной. Это важно для ярких цветных огней СД особенно красных, где эффект Гельмгольца-Кольрауша наиболее четко выражен.

Лампам на основе СД предстоит пройти еще большой путь, прежде чем они займут место традиционных ламп накаливания. Учитывая ряд специфических отличий СД от стандартных ламп (узкий спектральный диапазон и направленность излучения), необходимо провести работы по сертификации их на соответствие сигнальным огням. Принципиальным является совершенствование конструкции самой лампы для получения однородности диаграммы излучения при дальнейшем увеличении светового потока СД. Одно несомненно, что перспектива – за ними.

Анализ показывает, что предпочтительными для использования в лазерных СНО в настоящее время являются ЛД и ТЛДН.

Кроме того, в лазерных зрительных СНО могут быть использованы классические лазеры с существующими в настоящее время параметрами, например, современные He-Ne лазеры и твердотельные лазеры на кристалле Nd:YAG с преобразованием основной линии генерации, которые до сих пор являются альтернативой для большинства твердотельных лазеров как с накачкой от импульсных ламп, так и лазерных диодов.

Перспективным является применение в СНО лазерных источников на основе импульсных и сканирующих полупроводниковых лазеров с электронной накачкой, разработанных для лазерных систем проекционного цветного телевидения и систем отображения информации на экранах больших размеров в НИИ «Платан» (г. Фрязино) [33-37]. КПД ПЛЭН близок к КПД ЛД. ПЛЭН позволяют получить излучение при работе в непрерывном и импульсном сканирующих режимах мощностью до нескольких ватт в диапазоне  $\Delta\lambda = 370 - 900$  нм. Наиболее важным преимуществом ПЛЭН является возможность управления энергетическими и пространственными характеристиками с помощью электронного пучка. Это обстоятельство исключает необходимость использования сканирующих устройств и позволяет оптимизировать распределение интенсивности излучения в зоне ориентирования. Кроме того, появляется возможность с помощью одного лазера маркировать ориентационные секторы разного цвета.

Тем не менее в каждом случае при принятии решения о выборе источника необходим всесторонний учет всех аспектов их применения в конкретном виде СНО.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Remillard J. T., Marinelli V. A. and Fohf T. Automotive exterior lighting. From filaments to laser // Optics & Photonics News. - 1999. -Aug. - P. 40 - 43.
2. Conference Proceedings "Light Emitting Diodes 2000". San Mateo (California, USA), 13-15 Nov., 2000.
3. Bayers Guide of Pharos Marine & Automatic Power Inc. // Aids to Navigation. - 2000.
4. <http://www.ledtronics.com/>
5. <http://www.corvette-lights.ru/>
6. Абрамов В. С., Агафонов Д. Р., Виноградов К. А., Гордиенко А. И. Перспективы использования светодиодных источников света в зрительных средствах навигационного оборудования // Сборник докладов IV Научно-технической конференции "Современное состояние, проблемы навигации и океанографии" ("НО-2001"). - СПб: ГНИИНГИ. - 2001. - С. 13-16.
7. Каталог изделий ГУП "НИИ ПП". Томск. - 2000 г.
8. Абрамовский А. П., Бакин Н. Н., Вилисов А. А. и др. Полупроводниковые излучатели для сигнальных огней автономных навигационных систем // Сборник докл. IV Научно-технической конференции "Современное состояние, проблемы навигации и океанографии" ("НО-2001"). СПб: ГНИИНГИ. - 2001. - С. 16-18.
9. Герасимов В. М., Минаев Н. А., Николаев А. Ю. Возможность использования светодиодов с высокой интенсивностью излучения в зрительных СНО. Тезисы докладов II Российской конференции "Современное состояние, проблемы навигации и океанографии" ("НО-95"), СПб: ГНИИНГИ, 1995. С. 85-86.
10. Коган Л. М., Шмерлинг И. Е. Полупроводниковые светодиодные излучатели для светосигнальных приборов навигационных знаков водных путей // Светотехника. - 1998. - № 2. - С. 19 - 22.
11. IALA BATT / IALA LITES // Workshop, Coblenz (Germany), May 7-10, 2001.
12. Зуев В. Е., Пересыпкин В. И., Калошин Г. А. и др. Лазерные устройства для обеспечения судовождения. - Новосибирск: Наука, 1985, -128 с.
13. Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО-89). - Л.: ГУНиО МО, 1989. - 304 с.
14. Дополнение № 1 к справочнику по средствам навигационного оборудования (Часть 1).- СПб.: Изд. ГУНиО МО, 1996. - 279 с.
15. The IALA Navguide, 3<sup>rd</sup> edition, 1998.
16. OE Report // 2 Jan 2001.
17. Harle V., Kuther T. LEDs Increase in Brightness - and Potential // Europhotonics.- June/July 2001.- P.46 - 47.
18. Страчков М. И., Дмитриев Е. И., Виноградов К. А. Литиевые источники тока для электропитания светящихся СНО // Сб. докладов IV Росс. научно-технической конференции "Современное состояние, проблемы навигации и океанографии" ("НО-2001"). СПб: ГНИИНГИ, 2001. - С. 39-40.
19. <http://laser.stu.neva.ru/las>
20. Bayers Guide 2001 // The Optoelectronics Industry Sourcebook. Supplement to Laser Focus World. -2001. - Vol. 36, No 12.
21. Drollette Dan. Ion Laser: Lab Standbys Hang Tough // Photonics Spectra.- July 2000.- P. 96 - 100.
22. Matthews S. J. The pursuit of power //Laser Focus World.- 2000.- Sept.- P. 103 - 110.
23. Matthews S. J. Designing arrays for power //Laser Focus World.- 2000.- Oct.- P. 109 – 114.
24. S. J. Matthews. Laser diodes promise stability and control //Laser Focus World. - 2000. -Nov.- P. 109 - 116.
25. The Catalog for Laser and Photonics Application //Coherent. Auburn Croup. - 1998/99.
26. The Catalog of ORIEL Corporation // Stratford, CT, USA, 1994. -Vol. II.
27. Maltsev A. N. Novel laser on vibronic crystal with electron excitation as a lidar transmitter // Proceedings of The International Conference "AEROSENSE'99". - Orlando, FLA. USA, -1998. - P. 235-238.
28. Maltsev A. N., Korolev V. S., Kucharev V. N., Sharabarin E. V. Laser on vibronic type dielectric crystal with electron pumping // Proceedings of The Conference "CLEO/Europe – EQEC'98." Glasgow (Scotland, UK), 14-18 September, 1998.
29. Зуев В. В., Мальцев А. Н., Скрипка Г. А. и др. Генерация Ti3+:Al2O3 с электронным возбуждением // Письма в ЖЭТФ.- 1989. - 50.- №2. - С. 60-62.
30. Калошин Г. А., Мальцев А. Н. Перспективные источники света для зрительных навигационных устройств. Сб. докл. IV Российской научно-технической конференции "Современное состояние, проблемы навигации и океанографии" ("НО-2001"). СПб.: ГНИИНГИ. - 2001. - С. 33-36.
31. Патент РФ № 2114492. Светоизлучающий диод / Абрамов В. С., Беленьков Н. М., Денисов С. И. и Щербakov Н. В. Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений 27 июня 1998 г.
32. Padgham C. A., Saunders J. E. The Perception of Light and Colour. London, G. Bell & Sons Ltd, - 1975. P. 256.
33. МИ 0409. Лазерный трехцветный маяк//Изобретатель и рационализатор.-1998.- № 4.-С. 4.
34. Богданкевич О. В., Дарзнец С. А., Елисеев П. П. Полупроводниковые лазеры. М.: Наука. - 1976. - С. 416.
35. Макиенко О. М. Лазерные кинескопы нового поколения // Электроника: Наука, техника, бизнес. – 2000, - №6. -С. 54.
36. Уласюк В. Н. Квантоскопы.- М.: Радио и связь, 1988.
37. Амосов В. И., Давыдов А. А., Макиенко О. М. Квантоскоп, излучающий в синей области спектра.- М.: Электронная техника, 1988. Вып. 2(121). - С. 21.

---

## СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ГИДРОГРАФИИ, МОРСКОЙ КАРТОГРАФИИ И ГЕОФИЗИКИ

---

ГРНТИ 78.21.37.19.17

### **ЕСТЕСТВЕННЫЕ МАГНИТНЫЕ СИГНАЛЫ СЕЙСМОИСТОЧНИКОВ МОРСКОГО ШЕЛЬФА И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРИЕМА**

**П. И. МАЛЕЕВ,**  
(ГНИНГИ МО РФ)  
**А. П. НАУМОВ,**  
**В. И. ШЕРЕМЕТ**  
(АОЗТ "Криомаг")

*Исследуются естественные магнитные сигналы инфранизкочастотного диапазона. Показываются особенности их выделения из общих сигналов вариаций магнитного поля Земли.*

Работа посвящена исследованию в зонах морского шельфа магнитных сигналов инфранизкочастотного (ИНЧ) диапазона, имеющих естественное происхождение. ИНЧ сигналы многократно наблюдались при анализе геомагнитных вариаций магнитного поля (МП) Земли и подробно изучаются лишь последние 10-15 лет с целью предсказания землетрясений [1-6, 11].

Северная граница России включает большую территорию шельфовой зоны, около 40% которой имеют постоянные магнитные градиенты, достаточные для уверенного приема современными магнитоизмерительными средствами магнитных сигналов градиента МП Земли  $G$  ( $G = 0,03-0,5$  нТл/м). Изучение морских территорий, включающее магнитные съемки в океанах [8-10], позволили, как известно, выделить глобальные магнитные аномалии, связанные с разломами в зонах срединно-океанических хребтов, и многие другие естественные аномалии МП. В качестве примера приведем значения градиентов индукции, характеризующих постоянные магнитные аномалии слабомагнитного региона Балтийского моря и намного «более магнитного» региона в зоне Атлантического срединно-океанического разлома вблизи хребта Шписс [9]. Они равны 1-3 нТл/м и 10-26 нТл/м соответственно. В обоих случаях магнитная съемка велась с помощью ядерно-прецессионных магнитометров.

Помимо магнитных аномалий, постоянного МП, на основе которых трудно реализовать магнитометрическое навигационное устройство [7], следует остановиться на возможности применения и переменных магнитных сигналов ИНЧ диапазона [3-6], а также сигналов ультранизких (УНЧ) частот. Последние в ряде случаев, о которых пойдет речь ниже, имеют более мощные источники и, соответственно, большие величины сигналов (до 50 нТл по маг-

нитной составляющей). Использование столь мощных сигналов весьма перспективно для целей навигации [6]. Попробуем показать особенности их наблюдения и инструментального выделения из общего сигнала вариаций МП Земли. Попутно ответим и на другие важные вопросы, относящиеся к указанным переменным сигналам: в чем причины столь мощных сигналов, их поляризации и длительной стабильности.

Исследования велись в Крыму в зоне крупного тектонического разлома, проходящего по руслу р. Бельбек. Участок выбран вблизи побережья Черного моря, чтобы захватить часть шельфовой зоны. На рис.1 представлен район исследований с шельфом и разломной зоной. Настоящая статья является продолжением более ранних публикаций [5, 6] посвященных выявлению НЧ магнитных сигналов в Горном Крыму (пос. Черные Воды и микрополигон вблизи него [5]). Она содержит полевые материалы и некоторые другие записи МП в Горном и Степном Крыму (1980-е гг.), без которых было бы невозможно представить общую картину происходящего.

Изучая НЧ магнитные и электромагнитные литосферные сигналы на Крымском сейсмополигоне, мы обратили внимание на большую «отзывчивость» региона на землетрясения в Карпатах. Особенно заметно это проявлялось при глубокофокусных землетрясениях Вранча, когда средние по силе сейсмособытия в Карпатах отзывались резким (на 20-35 нТл) изменением МП в Крыму. Можно было также заметить, что нередко слабые толчки в Крыму предшествуют более сильным землетрясениям Вранча. Импульсное возмущение Крымского полигона толчком Вранча (назовем его отдачей), порождает затем медленное затухание возмущенного МП, имеющее резонансный характер. Примеры такой связи сейсмособытий приходилось неоднократно наблюдать, проводя измерения МП в Крыму: 14.07.1981 (Крым) - 18.07.1981 (Вранч); 19.03.1984 (Крым) - 21.03.1984 (Вранч); 03.01. 1988 (Крым) - 07.01.88 (Вранч); 10.04.1989 (Крым) - 13.04.1989 (Вранч); 13.05.1989 (Крым) - 16.05.1989 (Вранч) [5]. На рис. 2 представлено изменение магнитного поля в течение 20 суток при одной такой регистрации МП в Крыму во время местного события 14.07.1981. Там же видны фрагменты суточных вариаций после отдачи 18.07.1981 и сейсмоторолчков во Вранче. Фурье-анализ этой характерной магнитограммы за период времени около месяца выявил в колебаниях уров-

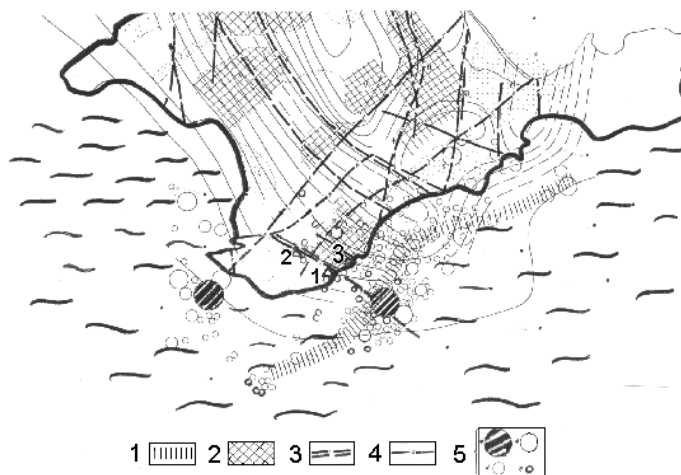


Рис. 1. Тектонические разломы и магнитные аномалии в районе Крымского полуострова  
1, 2 - магнитные аномалии; 3, 4 - тектонические разломы; 5 - эпицентры событий за период с 1910 по 1994 гг.  
Цифрами 1, 2, 3 на схеме обозначены пункты регистрации магнитного поля

на МП наличие мод с периодами 8, 12, 24 часа и 120-130 часов. (Помимо ИНЧ и УНЧ сигналов в диапазоне от 0,01 до 10 Гц, 24 часа - это интервал Sq, т.е.

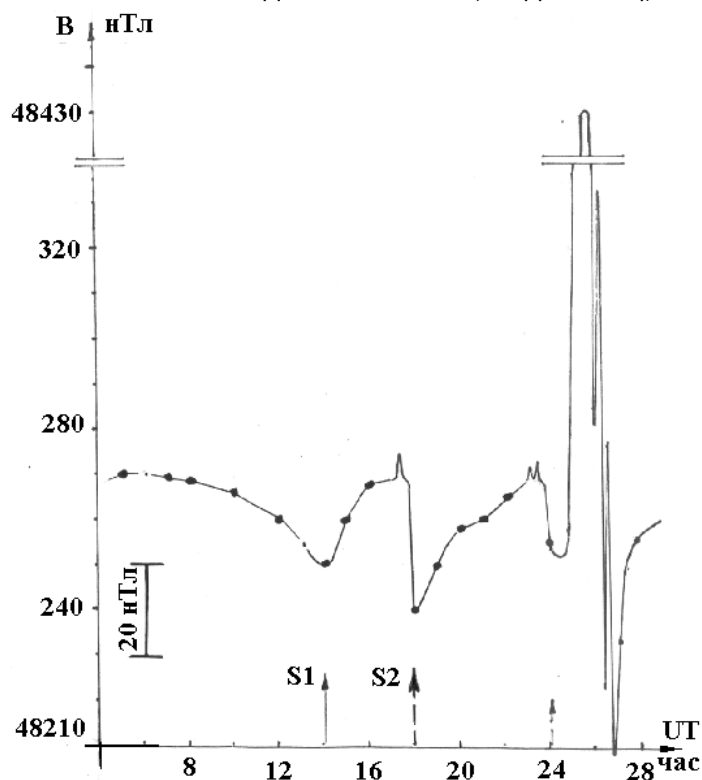


Рис. 2. Ход магнитного поля за период с 8 по 28.07.1981 в зоне Бельбекского разлома, п.п КПО и КП1.  
 S1 - местное сейсмособытие ( $K=5,7$ );  
 S2 - сигнал отдачи после сейсмособытия во Вранче (в 600 км от места КПО, 18.07.81, 00-02-57 по Гринвичу,  $M=5,4$ ).  
 Виден значительный сигнал за 25.07.81.  
 Размах МП за 25-26.07 (не менее 200 нТл) в несколько раз превышает солнечносуточные вариации

солнечно-суточных вариаций, а также кроме сигналов с периодом 107 мин., которые не выделяются методом Фурье-анализа, но хорошо видны визуально). Причем, как следует из рис. 2, о значительном затухании возмущений, привнесенных вранчевскими землетрясениями, можно было говорить лишь после 28 июля, т.е. спустя 10 дней после толчка 18.07.1981 во Вранче. Рис. 2 демонстрирует типичное спокойное развитие солнечно-суточной вариации, на которой едва ли можно усмотреть отзвук местного сейсмособытия (S1). Однако более детальная ночная магнитная запись 18.07 и дальнейшее развитие магнитных откликов на протяжении недели продемонстрировали более сложный колебательный характер магнитных сигналов в Крыму. Эволюция ИНЧ сигналов в дальнейшем – с 22.07 по 25.07 - имеет типично квазирезонансный характер: амплитуда колебаний вырастает более чем в 6 раз, а размах сигнала от 25.07 составляет более 200 нТл (!) (рис. 3).

С целью обобщения полученных данных и расширения географии наблюдений мы обратились к магнитным измерениям на Алмаатинском сейсмополигоне за 1984 г. Фурье-анализ 120-суточной магнитной записи сигнала с выхода квантового магнитометра с оптической накачкой выявил наличие в спектре МП моды со 130-часовой компонентой, подтвердились и сигналы с периодом 8, 12, 24 часа. Кроме того, наблюдались и более медленные спектральные компоненты – 9 и 22 суток. Последние связаны с «местными» сейсмособытиями на Памире. Анализ также показал, что каждое сейсмособытие характеризуется своей модой в спектре МП, а максимум амплитуды в разложении геомагнитных вариаций для конкретной моды, составляющей сигнал, совпадает со временем этого сейсмособытия. Изучалась поляризация ИНЧ



сигнала: он оказался ориентированным практически по вектору МП Земли, что совпадает с данными, приведенными в работе [3], хотя указанный в ней уровень сигналов был на два порядка меньше полученного нами. Длительная стабильность УНЧ и ИНЧ сигналов и их источников оценивалась по многократным наблюдениям в Крыму в течение летних сезонов 1981 – 1983 гг.: интенсивность НЧ, их морфология и характерные особенности источников в зоне пос. Черные Воды и в районе шельфа вблизи устья р. Бельбек не изменялись. Планируются дальнейшие полевые работы в этом регионе, что позволит оценить стабильность сигналов за больший срок.

Наличие в колебаниях уровня МП сигнала мод с периодами от 107 минут до 22 суток, которые характеризуют некоторые дальние сейсмособытия, и сопоставление результатов анализа с другими измерениями в этой же зоне, подтверждают вывод о том, что в подготовке землетрясений участвуют территории в тысячи километров. Есть основания говорить о глобальности этого процесса и его квазирезонансном колебательном характере. Сейсмособытия первичны, а деформационные и магнитные колебания вторичны, при этом деформационные колебания коррелированы с магнитными и при магнитных сигналах, о которых шла речь (см., например, результаты измерений в работе [12], с. 279), могут иметь амплитуду до 10-30 см.

Весьма характерная морфология и более чем значительная амплитуда УНЧ магнитных сигналов позволяют использовать их при измерениях в зонах мор-

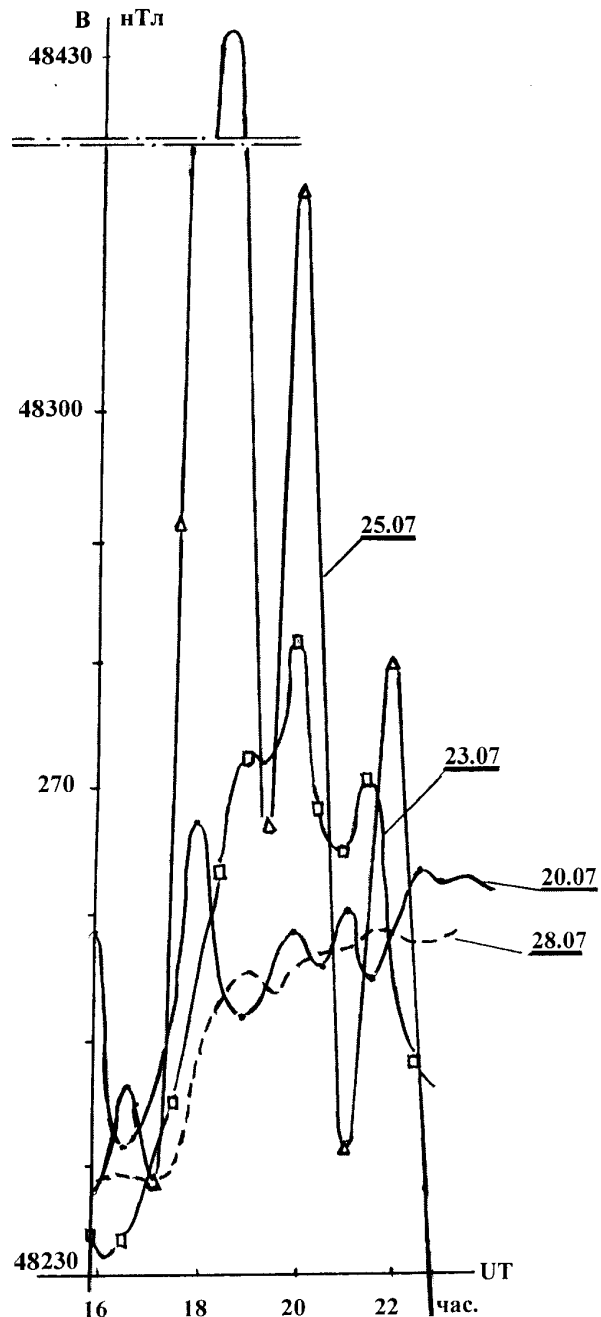


Рис. 3. Детальный ход магнитного поля за короткий период времени с 16 до 22 часов 20-го, 23-го, 25-го и 28-го июля 1981 г. Хорошо виден колебательный характер изменения МП и значительный рост сигнала 25 июля 1981 г.

ского шельфа и в сейсмоактивных морских регионах. Такие измерения целесообразно проводить при мониторинге последних, а также при разработке новых навигационных устройств на магнитоизмерительном принципе. В качестве приемника необходимо применять быстродействующие, разнесенные в пространстве на морском объекте магнитометры, имеющие на выходе регистратор на основе ЭВМ, с последующим Фурье-анализом вариаций МП для выделения описанных УНЧ сигналов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гохберг М. Б., Моргунов В. А. и др. Сейсмoeлектромагнитные явления. – М.: Наука, 1988. – 174 с.
2. Копытенко Ю. А., Матиаш Т. А. и др. Обнаружение УНЧ излучений, связанных со Спитакским землетрясением. М.: ИЗМИР АН СССР, 1990. Препринт № 3. – 25 с.
3. Крылов С. М., Никифорова Н.Н. О сверхнизкочастотном ЭМ излучении активной геологической среды // Физика Земли. – 1995. - № 6. – С. 42-57.
4. Наумов А. П., Шеремет В. И. Оперативный мониторинг сейсмоактивных зон морского шельфа и предупреждение катастроф // Тр. Международной конф. «ГА-2000» (6-9 июня 2000 г., С.-Петербург). – С. 64-66.
5. Наумов А. П. Импульсные низкочастотные сейсмамагнитные сигналы в вариациях геомагнитного поля - источник сейсмпрогноза // Вулканология и сейсмология. – 1998. - № 6. – С. 124-132.
6. Наумов А. П., Малеев П. И. Электромагнитные сигналы сейсмоисточников как естественные навигационные ориентиры. // Навигация и гидрография. – 1999. - №8. – С. 79-82.
7. Михлин Б. З., Селезнев В. П., Селезнев А. В. Геомагнитная навигация. – М: Машиностроение, 1976. – 290 с.
8. Вакье В. Геомагнетизм в морской геологии. Л.: Недра, 1976. – 320 с.
9. Трухин В. И., Бачин В. И. И др. Магнетизм срединно-океанического хребта Шписс // Физика Земли – 2000. – № 2. – С. 68-82.
10. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. – 482 с.
11. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1979. – 388 с.
12. Шебалин Н. В., Ибрагимов Р. Н. И др. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. // Сб. тр. под ред. Р. Б.Якубовича. Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.

ГРНТИ 78.21.37.21.25.25

#### **К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОДВИЖНОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО ОБЪЕКТА**

**П. И. МАЛЕЕВ**  
(ГНИНГИ МО РФ),  
**Б. М. СМИРНОВ,**  
**И. С. ХАСИЕВ,**  
**В. И. ШЕРЕМЕТ**  
(АОЗТ "Криомаг")

*В развитие описанного ранее метода определения магнитного поля подвижного объекта рассмотрен вариант решения, требующий всего лишь три вместо десяти синхронных измерения проекций векторов магнитной индукции и угловых положений объекта.*

Определение магнитной индукции геомагнитного поля с подвижного, в том числе морского, объекта является актуальной, но еще не решенной проблемой. Возникающие при этом трудности связаны главным образом с магнитными помехами, создаваемыми объектом за счет жесткой и мягкой намагниченности его корпуса и механизмов, а также магнитным полем электромаг-

нитного оборудования и полем вихревых токов, возникающих на электропроводящих поверхностях объекта. Измерение индукции геомагнитного поля на морских акваториях в настоящее время в основном осуществляется с помощью магнитометров, буксируемых за объектом на расстоянии 100–200 м. Предложенные ранее методы измерения с подвижного объекта с помощью магнитометров, расположенных непосредственно на его борту, не решают задачи выделения индукции магнитного поля помехи. Это приводит к существенной погрешности определения индукции геомагнитного поля, особенно если магнитная индукция объекта соизмерима с геомагнитным полем [1, 2].

Из двух предложенных нами ранее методов определения параметров Пуассона более совершенным представляется тот, который позволяет не использовать при измерении образец из магнитомягкого материала [3].

Однако для применения этого метода необходимо осуществлять измерения проекций как минимум десяти векторов магнитной индукции при синхронном измерении десяти угловых положений объекта.

В настоящей статье изложено новое техническое решение, в котором параметры Пуассона и постоянное магнитное поле объекта можно определить по результатам измерений магнитной индукции бортовым трёхкомпонентным магнитометром не при десяти, а лишь при четырёх угловых положениях объекта.

Пусть объект (корабль) стоит на якоре или бочке на рейде или лежит в дрейфе в акватории с известными параметрами геомагнитного поля. В результате парусности корабля непрерывно изменяется его курс и незначительно углы крена и дифферента. Измерим при четырёх угловых положениях объекта проекции векторов магнитной индукции  $V_{xi}$ ,  $V_{yi}$  и  $V_{zi}$ . Эти проекции можно выразить в виде следующих уравнений:

$$V_{xi} = S_{1i} (1 + a) + S_{2i} b + S_{3i} c + V_{xp}; \quad (1)$$

$$V_{yi} = S_{1i} d - S_{2i} (1 + e) + S_{3i} f + V_{yp}; \quad (2)$$

$$V_{zi} = S_{1i} q - S_{2i} h + S_{3i} (1+k) + V_{zp}, \quad (3)$$

где:  $S_{1i} = l_{1i} V_{xT} + m_{1i} V_{yT} + n_{1i} V_{zT}$ ;

$S_{2i} = l_{2i} V_{xT} + m_{2i} V_{yT} + n_{2i} V_{zT}$ ;

$S_{3i} = l_{3i} V_{xT} + m_{3i} V_{yT} + n_{3i} V_{zT}$ ;

$a, b, c, d, e, f, q, h, k$  – параметры Пуассона объекта;

$V_{xT}, V_{yT}, V_{zT}$  – проекции индукции геомагнитного поля;

$V_{xp}, V_{yp}, V_{zp}$  – проекции вектора магнитной индукции от жесткой намагниченности объекта.

При углах крена и дифферента, принимаемых за начальные, и трех углах магнитного курса  $\varphi_{mi}$  система уравнений для  $i = 1, 2, 3$  примет вид:

$$V_{xi} = \cos \varphi_{mi} (1 + a) V_{xT} - \sin \varphi_{mi} b V_{xT} + c V_{zT} + V_{xp}; \quad (4)$$

$$V_{yi} = \cos \varphi_{mi} d V_{xT} - \sin \varphi_{mi} (1 + e) V_{yT} + f V_{zT} + V_{yp}; \quad (5)$$

$$V_{zi} = \cos \varphi_{mi} q V_{xT} - \sin \varphi_{mi} h V_{yT} + (1+k) V_{zT} + V_{zp}, \quad (6)$$

Из уравнений (4) – (6) при  $i = 1, 2, 3$  определяют параметры Пуассона  $a, b, d, e, q, h$  и выражения  $cV_{zT} + V_{xp}, fV_{zT} + V_{yp}$  и  $(1+k) V_{zT} + V_{zp}$ . Затем при изменении, по крайней мере, одного из углов крена или дифферента, измеряют составляющие вектора магнитной индукции  $V_{x4}, V_{y4}, V_{z4}$  синхронно с измере-

нием этого угла и угла магнитного курса  $\varphi_{M4}$ . Выражения для  $V_{x4}$ ,  $V_{y4}$ ,  $V_{z4}$  можно представить в следующем виде:

$$V_{x4} = \ell_1(1+a)V_{xT} + m_1(1+a)V_{yT} + n_1(1+a)V_{zT} + \ell_2bV_{xT} + m_2bV_{yT} + n_2bV_{zT} + \ell_3cV_{xT} + m_3cV_{yT} + n_3cV_{zT} + V_{xp}; \quad (7)$$

$$V_{y4} = \ell_1dV_{xT} + m_1dV_{yT} + n_1dV_{zT} + \ell_2(1+e)V_{xT} + m_2(1+e)V_{yT} + n_2(1+e)V_{zT} + \ell_3fV_{xT} + m_3fV_{yT} + n_3fV_{zT} + V_{yp}; \quad (8)$$

$$V_{z4} = \ell_1qV_{xT} + m_1qV_{yT} + n_1qV_{zT} + \ell_2hV_{xT} + m_2hV_{yT} + n_2hV_{zT} + \ell_3(1+k)V_{xT} + m_3(1+k)V_{yT} + n_3(1+k)V_{zT} + V_{zp}; \quad (9)$$

где  $(\ell_1, m_1, n_1)$ ,  $(\ell_2, m_2, n_2)$ ,  $(\ell_3, m_3, n_3)$  – направляющие косинусы магниточувствительного элемента датчика (относительно геомагнитной системы координат), являющиеся функциями магнитного курса  $\varphi_{M5}$  крена дифферента объекта. Подставив в уравнения (7) – (9), полученные ранее  $a, b, d, e, q, h$  и выражения  $cV_{zT} + V_{xp}$ ,  $fV_{zT} + V_{yp}$  и  $(1+k)V_{zT} + V_{zp}$ , можно определить недостающие параметры Пуассона  $c, f, k$  и проекции вектора магнитной индукции объекта  $V_{xp}$ ,  $V_{yp}$  и  $V_{zT}$ , обусловленные жестким намагничиванием объекта.

Вместо магнитного курса объекта измерения можно проводить в географической системе координат или в любой другой выбранной системе координат объекта. В этом случае следует сначала измерить проекции трех векторов магнитной индукции при трёх отличающихся друг от друга курсах корабля. Уравнения для этих измерений можно выразить в следующем виде:

$$V_{xi} = \cos\varphi_i(1+a)V_{xT} + \sin\varphi_i(1+a)V_{yT} - \sin\varphi_i bV_{xT} + \cos\varphi_i bV_{yT} + cV_{zT} + V_{xp}; \quad (10)$$

$$V_{yi} = \cos\varphi_i dV_{xT} + \sin\varphi_i dV_{yT} - \sin\varphi_i(1+e)V_{xT} + \cos\varphi_i(1+e)V_{yT} + fV_{zT} + V_{yp}; \quad (11)$$

$$V_{zi} = \cos\varphi_i qV_{xT} + \sin\varphi_i qV_{yT} - \sin\varphi_i hV_{xT} + \cos\varphi_i hV_{yT} + (1+k)V_{zT} + V_{xp}. \quad (12)$$

Из уравнений (10) – (12) для  $i = 1, 2, 3$  определяют параметры Пуассона  $a, b, d, e, q, h$  и выражения  $cV_{zT} + V_{xp}$ ,  $fV_{zT} + V_{yp}$  и  $(1+k)V_{zT} + V_{zp}$ . Затем при изменении, по крайней мере, одного из углов крена или дифферента объекта, измеряют составляющие вектора магнитной индукции  $V_{x4}$ ,  $V_{y4}$ ,  $V_{z4}$  синхронно с измерением углов курса, крена или дифферента объекта. Выражения для  $V_{x4}$ ,  $V_{y4}$ ,  $V_{z4}$  аналогичны (4) – (6), поэтому недостающие параметры Пуассона  $c, f, k$  и проекции вектора магнитной индукции объекта  $V_{xp}$ ,  $V_{yp}$ ,  $V_{zp}$  определяют аналогично, как и ранее, при известном магнитном курсе.

Далее, решая систему трёх уравнений, аналогичную системе уравнений (1) – (3), по проекциям вектора магнитной индукции, измеренным синхронно с углами курса, крена или дифферента объекта, а также известным параметрам Пуассона объекта и проекциям вектора магнитной индукции  $V_{xp}$ ,  $V_{yp}$ ,  $V_{zp}$  определяют проекции вектора индукции геомагнитного поля.

Поскольку каждое дополнительное измерение в реальных условиях приводит к увеличению погрешности, то значительное уменьшение числа измерений углов курса, крена или дифферента объекта синхронно с измерениями проекций векторов магнитной индукции уменьшает эту погрешность. Это и достигается изложенным техническим решением, поскольку для определения параметров Пуассона и постоянного магнитного поля объекта требуется в 2,5 раза меньше измерений проекций векторов магнитной индукции и измерений углового положения объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысенко А. П. Теория и методы компенсации магнитных полей // Геофизическое приборостроение. - Л.: Мингеологии и охраны недр СССР, ОКБ. –1960. - Вып. 7 - С. 44 – 58.
2. Резник Э. Е., Канторович В. Л. Некоторые вопросы компенсации магнитных помех самолета // Геофизическое приборостроение. - Л.: Недра, 1964. - Вып. 18. - С. 26 – 38.
3. Малеев П. И., Смирнов Б. М. Методы определения составляющих вектора магнитной индукции магнитного поля Земли с ферромагнитного объекта // Навигация и гидрография. – 1999. - №8. -С. 82-86.

ГРНТИ 78.21.37(37.01.11)

**ОБ ИЗМЕРЕНИИ СИЛОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ДВИЖУЩИХСЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НОСИТЕЛЕЙ**

**В. А. БЛЕДНОВ**  
(СПбФ ИЗМИРАН)

*В статье обосновывается метод определения силовых составляющих геомагнитного поля непосредственно на ферромагнитном носителе магнитометрической аппаратуры. Метод основан на измерении суммарного магнитного поля трех-компонентным магниточувствительным преобразователем при естественной пространственной переориентации носителя. Для обеспечения измерения силовых компонент метод включает переориентировку относительно магниточувствительных преобразователей дополнительной ферромагнитной массы, на которую воздействуют включением и выключением известного (эталонного) источника магнитного поля.*

В настоящее время геомагнитное поле (ГМП) в океане изучается с помощью буксируемых магнитометров или с немагнитных судов. Длительное время специалисты искали пути для измерения параметров ГМП непосредственно с судов, изготовленных из ферромагнитных материалов. Первым результатом исследований, представляющим интерес для практики, явилась разработка теории и создание макетного устройства, позволяющего измерять угловые компоненты ГМП непосредственно на ферромагнитном судне [1, 2]. Экспериментальные исследования образца в натуральных морских условиях подтвердили разработанные теоретические положения. На очереди стала задача измерения силовых компонент ГМП. Первым шагом в решении этой задачи можно считать совместные измерения угловых компонент непосредственно на судне и модуля вектора индукции ГМП с помощью буксируемого магнитометра, что технически может быть реализовано в настоящее время. Следующим шагом должно являться решение проблемы измерения силовых компонент ГМП непосредственно на судне. Настоящая статья направлена на решение данной проблемы и посвящена изложению одного из методов [3, 4].

Предлагаемый метод основан на новом принципе изучения ГМП [1, 2]. До последнего времени незыблемым считалось положение, суть которого заключалась в том, что собственное поле ферромагнитных масс носителя является главной помехой и для ее исключения целесообразно использовать принцип компенсации. Исследования, основанные на этом принципе, не по-

зволюли сколько-нибудь приемлемо решить задачу измерения ГМП на ферромагнитном носителе. Новый принцип, положенный в основу метода определения угловых компонент ГМП, предусматривал не компенсацию, а использование информации, имеющейся в составляющих собственного магнитного поля намагниченных ГМП магнитомягких ферромагнитных масс.

Сущность предлагаемого метода можно проиллюстрировать предлагаемой схемой изучения ГМП (рис. 1). Пусть носитель представляется ферромагнитным стержнем (ФС), на котором жестко закреплен компонентный магниточувствительный преобразователь (МЧП) и дополнительная ферромагнитная масса (ДФМ), которая может изменять свое положение относительно МЧП. Будем полагать, что измерения выполняются в плоскости магнитного меридиана, собственное поле ФС в точке установки МЧП определяется только одним параметром Пуассона  $a$ , а собственное поле ДФМ – параметром Пуассона  $a_1$ . При изменении положения ДФМ относительно МЧП параметр  $a_1$  изменяется на параметр  $a_2$ . На основе уравнения Пуассона из работы [5] при таких допущениях можно выразить модуль вектора суммарного магнитного поля  $T_1$ , который будет измерен МЧП для первого случая ориентации ДФМ:

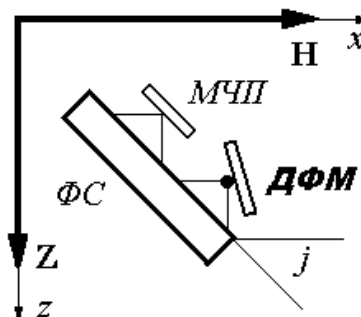


Рис. 1. Принцип метода измерения силовых компонент

$$T_1' = (1 + a + a_1) H \cos j + (1 + a + a_1) Z \sin j + (P + P_1), \quad (1)$$

где:  $H$  и  $Z$  – горизонтальная и вертикальная компоненты ГМП соответственно;  
 $P$  и  $P_1$  – постоянные составляющие собственного поля ФС и ДФМ соответственно;  
 $j$  – угол ориентировки ФС в ГМП.

Если изменение положения ДФМ относительно МЧП происходит значительно быстрее, чем изменение ориентации ФС в ГМП (изменение угла  $j$ ), то аналогичное уравнение для другого положения ДФМ выглядит следующим образом:

$$T_2' = (1 + a + a_2) H \cos j + (1 + a + a_2) Z \sin j + (P + P_2), \quad (2)$$

где  $P_2$  – постоянная составляющая собственного поля ДФМ при новой ориентации.

Взяв разность выражений (1) и (2), получим:

$$T_1' - T_2' = (a_1 - a_2) H \cos j + (a_1 - a_2) Z \sin j + (P_1 - P_2). \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что разность суммарных полей не зависит от собственного магнитного поля ферромагнитного стержня. Выполним три цикла подобных измерений при разной ориентировке ФС, т. е. при разных значениях угла  $j$ . Тогда получим систему из трех уравнений, в результате решения которой определяются:

$$\left. \begin{aligned} (a_1 - a_2)H &= H_r; \\ (a_1 - a_2)Z &= Z_r; \\ (P_1 - P_2) &= P_r, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $H_r, Z_r, P_r$  – величины, полученные в результате решения системы уравнений.

Чтобы определить силовые компоненты  $H$  и  $Z$ , необходимо разделить  $(a_1 - a_2)$  и  $H$ , а также  $(a_1 - a_2)$  и  $Z$ . Для решения этой задачи выполним повторные измерения при воздействии на ДФМ известного магнитного поля  $X_s$ . Созданное эталонное поле изменяет суммарное поле. Тогда уравнения (1) и (2) будут преобразованы следующим образом:

$$T'_{1S} = (1+a)H \cos j + (1+a)Z \sin j + a_1(H \cos j + Z \sin j + X_s) + (P + P_1), \quad (5)$$

$$T'_{2S} = (1+a)H \cos j + (1+a)Z \sin j + a_2(H \cos j + Z \sin j + X_s) + (P + P_2). \quad (6)$$

Взяв разность равенств (5) и (6), получим разность величин индукции суммарного поля при наличии эталонного магнитного поля

$$T'_{1S} - T'_{2S} = (a_1 - a_2)H \cos j + (a_1 - a_2)Z \sin j + (a_1 - a_2)X_s + (P_1 - P_2). \quad (7)$$

Определив разность выражений (3) и (7), получим:

$$(T'_{1S} - T'_{2S}) - (T'_1 - T'_2) = (a_1 - a_2)X_s. \quad (8)$$

Из формулы (8) находим разность параметров Пуассона, характеризующих собственное магнитное поле ДФМ:

$$a_1 - a_2 = \frac{(T'_{1S} - T'_{2S}) - (T'_1 - T'_2)}{X_s}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что ряд измерений, выполненных по указанной методике, дает возможность оперативного определения разности параметров  $(a_1 - a_2)$ . Подставив выражения для  $(a_1 - a_2)$  в уравнения (4), получим искомые величины:

$$\left. \begin{aligned} H &= \frac{H_r X_s}{\Delta T_S - \Delta T_I}; \\ Z &= \frac{Z_r X_s}{\Delta T_S - \Delta T_I}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где  $\Delta T_S = (T'_{1S} - T'_{2S})$ ,  $\Delta T_I = (T'_1 - T'_2)$ .

По полученным данным возможно определение составляющих магнитного поля ФС  $aH, aZ$  и  $P$ .

Следует заметить, что, используя зависимости (4) и процедуру из работ [1, 2], можно определить дополнительно к силовым компонентам и угловые компоненты.

Рассмотрим решение поставленной задачи на движущемся носителе (например, судне), не ограничивая ее никакими дополнительными условиями. Для этого установим на судне:

- трех компонентный магниточувствительный преобразователь (МЧП), измеряющий три составляющих вектора индукции суммарного магнитного поля;
- дополнительную ферромагнитную массу (ДФМ) с устройствами, обеспечивающими ее переориентировку относительно МЧП;
- электромагнит, устанавливаемый на ДФМ;
- систему определений ориентации судна по курсу, углам бортовой и килевой качки, в качестве которой может быть использована инерциальная навигационная система;
- вычислительно-управляющую систему, например, ПЭВМ с устройствами сопряжения и регистрации результатов измерений.

Экспериментальные исследования макета устройства, измеряющего угловые компоненты ГМП непосредственно на ферромагнитном судне, показали, что решение задачи определения угловых компонент ГМП обеспечивается даже при спокойном состоянии моря, когда переориентировка судна не превышает  $0,5^\circ$ . Можно ожидать, что при аналогичных условиях будет решена и задача определения силовых компонент.

Поскольку период переориентировки судна составляет не менее 10 секунд, то во время кратковременной переориентировки ДФМ положение судна можно считать неизменным. В таком случае матрицу  $|S|$  угловой ориентировки судна можно принять постоянной за цикл измерений.

С учетом изложенного выше получим зависимости вектора индукции для суммарного магнитного поля при выключенном электромагните. В соответствии с уравнением Пуассона [5] вектор индукции суммарного магнитного поля в первом положении ДФМ будет выражаться зависимостью:

$$\mathbf{T}'_1 = \begin{vmatrix} 1+\mathbf{a}+\mathbf{a}_1 & \mathbf{b} & \mathbf{c} \\ \mathbf{d} & 1+\mathbf{e}+\mathbf{e}_1 & \mathbf{f} \\ \mathbf{g} & \mathbf{h} & 1+\mathbf{k}+\mathbf{k}_1 \end{vmatrix} |S| \mathbf{T} + (\mathbf{T}_p + \mathbf{T}_{1p}), \quad (11)$$

где  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{e}$ ,  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{g}$ ,  $\mathbf{h}$  и  $\mathbf{k}$  – параметры Пуассона собственного поля судна в месте установки МЧП;

$\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{e}_1$  и  $\mathbf{k}_1$  – параметры Пуассона собственного поля ДФМ в месте установки МЧП;

$\mathbf{T}$  – вектор индукции ГМП;

$\mathbf{T}_1$  и  $\mathbf{T}_{1p}$  – векторы индукции постоянного магнитного поля судна и ДФМ соответственно.

При втором положении ДФМ вектор индукции суммарного магнитного поля будет выражаться новой зависимостью:



$$\mathbf{T}'_2 = \begin{vmatrix} 1+\mathbf{a}+\mathbf{a}_2 & \mathbf{b} & \mathbf{c} \\ \mathbf{d} & 1+\mathbf{e}+\mathbf{e}_2 & \mathbf{f} \\ \mathbf{g} & \mathbf{h} & 1+\mathbf{k}+\mathbf{k}_2 \end{vmatrix} |\mathbf{S}| \mathbf{T} + (\mathbf{T}_p + \mathbf{T}_{2p}), \quad (12)$$

где  $\mathbf{a}_2$ ,  $\mathbf{e}_2$  и  $\mathbf{k}_2$  – параметры Пуассона собственного поля ДФМ при новом положении ДФМ;

$\mathbf{T}_{2p}$  – вектор индукции постоянного магнитного поля ДФМ при новом его положении.

Если уравнения (11) и (12) составляются при одном и том же положении носителя (сохраняется равенство матриц  $|\mathbf{S}|$ ), то их разность равна

$$\mathbf{T}'_1 - \mathbf{T}'_2 = \begin{vmatrix} \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 \end{vmatrix} |\mathbf{S}| \mathbf{T} + (\mathbf{T}_{1p} - \mathbf{T}_{2p}). \quad (13)$$

Уравнение (13) принципиально отличается от уравнения Пуассона. Оно имеет диагональную матрицу, составленную из параметров, значения которых зависят от намагниченности только ДФМ, и совершенно не зависят от собственного магнитного поля носителя. Выполним три цикла подобных измерений при разной ориентировке судна, т. е. при разных матрицах  $|\mathbf{S}|$ . Тогда получим систему из трех уравнений в результате решения которой определяются:

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2)\mathbf{X} &= \mathbf{X}_r; \\ (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2)\mathbf{Y} &= \mathbf{Y}_r; \\ (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)\mathbf{Z} &= \mathbf{Z}_r; \\ \mathbf{T}_{1p} - \mathbf{T}_{2p} &= \mathbf{T}_r, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где:  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{Y}$  и  $\mathbf{Z}$  - силовые компоненты ГМП;

$\mathbf{X}_r$ ,  $\mathbf{Y}_r$ ,  $\mathbf{Z}_r$  и  $\mathbf{T}_r$  - величины, полученные в результате решения системы уравнений.

Теперь рассмотрим зависимости при включении электромагнита, создающего вектор индукции эталонного поля:

$$\mathbf{T}_s = \begin{vmatrix} \mathbf{X}_s \\ \mathbf{Y}_s \\ \mathbf{Z}_s \end{vmatrix}.$$

Аналогично уравнению (13) можно получить разность величин векторов индукции суммарного магнитного поля при включенном электромагните

$$\mathbf{T}'_{1s} - \mathbf{T}'_{2s} = \begin{vmatrix} \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 \end{vmatrix} |\mathbf{S}|(\mathbf{T} + \mathbf{T}_s) + (\mathbf{T}_{1p} - \mathbf{T}_{2p}). \quad (15)$$

Получим три уравнения, подобных уравнению (15), при разной ориентировке судна. Решив систему этих уравнений, найдем:

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2)(\mathbf{X} + \mathbf{X}_s) &= \mathbf{X}'_s ; \\ (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2)(\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_s) &= \mathbf{Y}'_s ; \\ (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)(\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_s) &= \mathbf{Z}'_s . \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $\mathbf{X}'_s$ ,  $\mathbf{Y}'_s$ ,  $\mathbf{Z}'_s$ , - промежуточные величины, полученные в ходе решения системы уравнений.

Взяв разность правых и левых частей равенств (14) и (16), после преобразования получим разности параметров Пуассона:

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2) &= \frac{\mathbf{X}'_s - \mathbf{X}_r}{\mathbf{X}_s} ; \\ (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2) &= \frac{\mathbf{Y}'_s - \mathbf{Y}_r}{\mathbf{Y}_s} ; \\ (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) &= \frac{\mathbf{Z}'_s - \mathbf{Z}_r}{\mathbf{Z}_s} . \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Подставив найденные величины в формулы (14), получим искомые силовые компоненты ГМП:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X} &= \frac{\mathbf{X}_s \mathbf{X}_r}{\mathbf{X}'_s - \mathbf{X}_r} ; \\ \mathbf{Y} &= \frac{\mathbf{Y}_s \mathbf{Y}_r}{\mathbf{Y}'_s - \mathbf{Y}_r} ; \\ \mathbf{Z} &= \frac{\mathbf{Z}_s \mathbf{Z}_r}{\mathbf{Z}'_s - \mathbf{Z}_r} . \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Таким образом, измерив величины  $\mathbf{T}'_1$ ,  $\mathbf{T}'_2$ ,  $\mathbf{T}'_{1s}$ ,  $\mathbf{T}'_{2s}$  вектора индукции суммарного магнитного поля при различных ориентировках ДФМ и судна при включенном и выключенном электромагните, можно определить силовые компоненты ГМП. Так как при этом могут быть получены и угловые компонен-

ты ГМП разработанным ранее методом, то будет решен вопрос определения всех составляющих вектора ГМП.

Выполненные разработки указывают на возможность создания высоко-точной магнитометрической системы, способной работать не только на ферромагнитном судне, что является наиболее сложным вариантом практической реализации предложенных методов определения как угловых, так и силовых компонент ГМП, но и на других типах носителей: самолетах, вертолетах, спутниках и на ряде других движущихся объектов.

Изучение всех составляющих вектора индукции ГМП непосредственно на судне в океане позволит решить ряд научных и прикладных задач:

- исследование пространственного распределения силовых и угловых компонент ГМП в океане;
- обеспечение геомагнитной навигации с использованием компонент ГМП;
- определение магнитного курса судна;
- определение составляющих собственного магнитного поля судна;
- текущий контроль за магнитным состоянием судна;
- обнаружение и картирование трасс нефте- и газопроводов;
- диагностика технического состояния нефте- и газопроводов, силовых кабельных линий и т. п.;
- поиск затонувших объектов;
- позиционирование относительно естественных или искусственных реперов, например, для полупогружных буровых установок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бледнов В. А. Компонентные геомагнитные измерения на борту движущегося ферромагнитного носителя // Успехи физических наук. - 1994. - Т. 164. - № 9. - С.1001-1005.
2. Бледнов В. А. Компонентные геомагнитные измерения на борту движущегося ферромагнитного носителя // Доклады академии наук.- 1995. - Т. 341. - № 2. - С. 251-254.
3. Бледнов. В. А. Определение компонент геомагнитного поля на движущихся ферромагнитных объектах // Доклады академии наук. –1997. - Т. 355. - № 1. - С.101-103.
4. Бледнов. В. А. Основные принципы определения компонент магнитного поля Земли на движущихся ферромагнитных объектах (основы теории разделения полей)// Успехи физических наук. - 1997. - Т. 167. - № 10. - С.1013-1018.
5. Нечаев П. А, Григорьев В. В. Магнитно-компасное дело. - М.: Транспорт,1964. – 267 с.

**ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ И ЛИТОДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА  
СЕВЕРО-ВОСТОКА САХАЛИНА**

**С. М. УСЕНКОВ**  
(СПбГУ)

*На основании результатов многолетних комплексных натурных исследований рассматриваются особенности морфологии, литологии и литодинамики береговой зоны северо-востока Сахалина. Установлено, что основными типам осадков являются среднезернистые пески, мелкозернистые пески и разномзернистые пески с гравийно-галечным материалом. Первые два относятся к современным осадкам, а последние являются реликтовыми. Выявлена специфика изменений рельефа дна в зависимости от гидродинамического режима.*

Комплексное исследование шельфов морей и океанов, особенно их мелководных прибрежных участков, становится актуальной проблемой современной геологической науки. Успешное решение данной проблемы предполагает, в частности, всестороннее изучение рельефа, литодинамики и литологии береговой зоны.

В литературе практически отсутствуют сведения о характере литодинамических процессов и особенностях морфоседиментогенеза в прибрежной зоне северо-востока Сахалина. Вместе с тем для этого района, где более двух десятилетий ведутся интенсивные морские нефтепоисковые работы, и началась непосредственная эксплуатация месторождений, всестороннее изучение береговой зоны имеет первостепенное значение. Это необходимо при выборе мест для подводных буровых установок, обустройстве месторождений (прокладка нефтепроводов и коммуникационных линий, проектирование и возведение объектов социального обеспечения на побережье и т. п.), строительстве портов-убежищ, а также для решения ряда других задач.

В основу работы (статьи) положен материал, собранный на северо-восточном побережье Сахалина в конце 70-х – начале 80-х гг. во время экспедиционных исследований, проводившихся кафедрой литологии и морской геологии Санкт-Петербургского государственного университета. В период исследований осуществлялись систематические гидрометеорологические наблюдения (фиксировались параметры и направление волн, ветров и течений, а также изменения уровня моря), наблюдения за характером изменения рельефа пляжа и подводного берегового склона путем повторных нивелировок и промера глубин. Для выяснения латерального распределения прибрежно-морских осадков на пляже и подводном береговом склон до 45-50-метровой изобаты были отобраны пробы.

**Общие особенности района исследований**

Район исследований расположен на северо-востоке Сахалина (рис. 1), побережье которого подвержено активному воздействию ветрового волнения и волн зыби. Обычная высота волн в береговой зоне колеблется от 1 до 2 м. Максимальные высоты волн составляют 7 м. Ветровые волнения и зыбь индуцируют разнообразные волновые течения, скорости которых могут дости-

гать весьма значительных величин (до 127 см/с). Существенную роль в прибрежной циркуляции играют также приливные колебания уровня, которые достигают 2-2,3 м. Они вызывают периодическое смещение зон наиболее активного воздействия на дно, и кроме того, с ними связаны приливные течения со скоростями до 60 см/с.

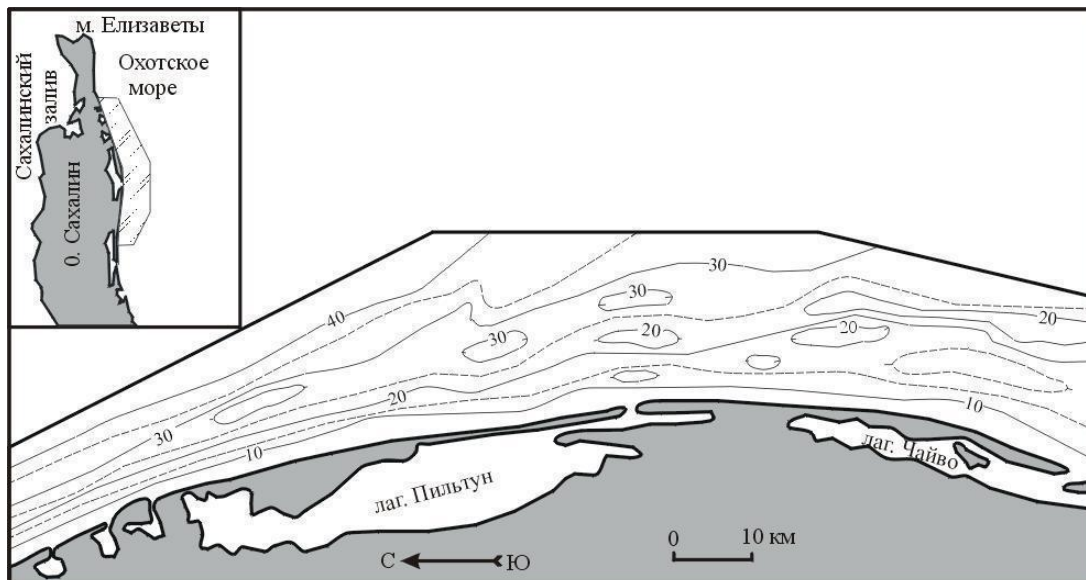


Рис. 1. Схема расположения и батиметрия района исследований

Берега и дно исследованного района сложены главным образом рыхлыми терригенными (в основном глинисто-песчаными) породами неогена. По строению и характеру развития побережье относится в основном к аккумулятивному типу. Подводный склон отмельный, сложен рыхлыми осадками и осложнен аккумулятивными телами. Особенностью является широкое развитие лагун. Основными элементами строения служат различные аккумулятивные формы: косы, пересыпи, береговые бары. Во многих основаниях кос отмечаются коренные цоколи, сложенные позднеогеновыми отложениями. С островной стороны к лагунам примыкает древняя береговая линия со следами абразионной деятельности. Лагуна Пильтун, где на стационарной площадке велись основные наблюдения за гидро- и литодинамическими особенностями береговой зоны, является одной из наиболее крупных лагун северо-восточного побережья. Она имеет длину около 120 км. Южный берег ее представлен полуостровом с террасой и южной ветвью косы лагуны. Терраса и коса образованы сериями валов. Северная коса лагуны вытянута к югу в одну линию с берегом. В северной части косы четко прослеживаются береговые валы, отражающие различные стадии ее роста.

В геоморфологическом отношении присахалинский шельф в первом приближении подразделяется на ряд типов. В районах, примыкающих к областям поднятий (от мыса Елизаветы до мыса Лавенштерна), прибрежная мелководная зона сужена, она быстро сменяется материковым склоном, ко-

торый в таких районах крут и сложно расчленен. Обычны скалистые бенчи и участки дна, лишенные наносов.

В районах, примыкающих к областям депрессий, развиты обширные мелководные участки дна со слабо выраженными положительными формами рельефа. Поверхность дна на разных гипсометрических уровнях осложнена серией сглаженных ступеней, интерпретируемых как древние береговые линии, фиксирующие временное стояние уровня моря в ходе послеледниковой трансгрессии.

### Литологические особенности осадков

Осадки береговой зоны северо-восточной части Сахалина представлены исключительно терригенными разностями, которые образуют широкий гранулометрический спектр: от галечных до крупных алевритов включительно. На основании результатов дробного ситового анализа с учетом преобладающей фракции среднего размера частиц выделены основные типы донных осадков: гравийно-галечные, разнозернистые пески с гравийно-галечным материалом, среднезернистые пески, мелкозернистые пески и крупные алевриты.

Как видно из картосхемы, построенной по методу преобладающей фракции с учетом коэффициента отсортированности (рис. 2), существуют четкие закономерности в пространственном распределении отдельных типов осадков района исследований.

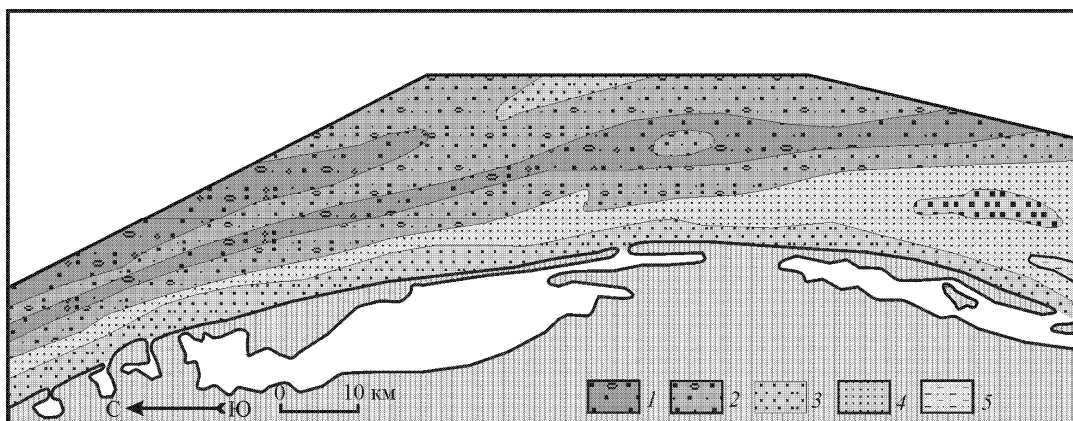


Рис. 2. Картосхема гранулометрических типов осадков в прибрежной зоне северо-восточной части о-ва Сахалин.

- 1 – гравийно-галечные осадки со средне-крупнозернистым песком;
- 2 – разнозернистые пески с гравийно-галечным материалом;
- 3 – среднезернистые пески; 4 – мелкозернистые пески;
- 5 – крупные алевриты

Основную массу осадков верхних частей пляжа и подводного склона до 6-8 – метровой изобаты слагают среднезернистые пески, которые образуют узкую полосу примерно одной и той же ширины вдоль всего побережья (1-1,5 км). В морфодинамическом отношении поле развития среднезернистых песков отвечает зоне подводных валов, где идет активное забурунивание и разрушение ветровых волн.

Далее в море среднезернистые пески постепенно сменяются мелкозернистыми, образующими также параллельную берегу полосу, ширина которой остается практически постоянной в северной и центральной частях района (2,5-3 км) и довольно резко возрастает на юге (начиная с северной оконечности лагуны Чайво), достигая 10 км. Поле распространения данного типа осадков соответствует той части подводного берегового склона, где наблюдается деформация ветровых волн.

В полосе мелкозернистых песков на глубинах 12-16 м отмечается зона развития более крупных осадков (разнозернистые пески). В южной части района она выражена достаточно четко в виде широкой полосы. В центральной и северной частях разнозернистые пески фиксируются только в отдельных пробах.

На глубинах свыше 20-40 м мелкозернистые пески сменяются разнозернистыми с гравийно-галечным материалом. В поле их развития на глубинах 22-25 м фиксируется относительно узкая полоса гравийно-галечных осадков со значительным содержанием песчаного материала. Зона развития подобных осадков отмечается также и в северной части исследованного района на глубинах 38-40 м.

Крупные алевроиты имеют крайне ограниченное распространение. Они наблюдаются лишь в отдельных пробах, приуроченных, как правило, к понижениям в рельефе дна.

Анализ распределения отдельных гранулометрических типов осадков исследованного района позволяет сделать некоторые общие выводы.

Во-первых, наиболее распространенными осадками являются разнозернистые пески; сравнительно меньшее значение имеют гравийно-галечные осадки и мелкозернистые пески.

Во-вторых, осадки локализуются полосами, которые за редким исключением идут параллельно изобатам, т. е. распространение отдельных типов осадков контролируется рельефом дна и гидродинамикой.

В-третьих, появление разнозернистых песков и грубых осадков на глубинах свыше 20-24 м нарушает общую картину распределения осадков от берега в море, предполагающую, что более крупные осадки сменяются более мелкими.

Проведенные детальные исследования структуры, минерального состава и фациальных особенностей позволили ранее сделать вывод о реликтовой природе этих отложений [1, 2, 3]. К реликтовым мы относим также и выделяемые по данным эхолотирования абразионные уступы и прилегающие к ним платформы. На эхограммах они фиксируются в виде или четких перегибов дна, или гофрированности (пилообразности) рельефа.

Комплексы абразионных форм сопутствующих грубых осадков несомненно указывают положение затопленных береговых линий, фиксирующих временные положения уровня моря в ходе последней послеледниковой трансгрессии. Всего в изученной части шельфа северо-востока Сахалина выявлено три таких линии, расположенных соответственно на глубинах 12-16 м, 22-25 м и свыше 38-40 м.

### **Характеристика гидро- и литодинамических процессов в различных зонах верхней части шельфа**

В соответствии с характером деформации волн, степенью их воздействия на дно и влиянием других гидродинамических факторов в прибрежной части шельфа о-ва Сахалин можно выделить три зоны [4]. Участок дна между первой от моря линией разрушения волн – по типу ныряющего буруна – и нижней (морской) границей береговой зоны мы, вслед за Н. А. Айбулатовым [5] будем называть внешней зоной. Ее верхняя граница на северо-востоке Сахалина проходит в районе 8-метровой изобаты, а нижняя совпадает с глубиной начального воздействия на дно наиболее крупных штормовых волн. Это зона относительно слабой деформации волн открытого моря, начинающих испытывать трение о дно. Динамические процессы обуславливаются здесь воздействием разного рода течений, и в первую очередь дрейфовых [6]. Н. А. Айбулатов [5] указывает на значительную роль волновых течений, имеющих в этой зоне пульсационный характер.

Ближе к берегу выделяется зона забурунивания (разрушения) волн, которое происходит при уменьшении глубины под идущей к берегу волной. Во время волнения здесь отмечаются сильная деформация волн и интенсивное гашение волновой энергии, однократное, а чаще многократное разрушение и перестраивание волн на мелководье. Это приводит к очень высокой турбулентности вод в зоне разрушения, к образованию в штормовых условиях волнового потока с ярко выраженным однозначным перемещением водных масс, которое увеличивается в сторону берега вплоть до уреза, и к возникновению различных течений, скорости которых в ходе штормовых волнений могут достигать в районе исследований 1-1,3 м/с, а при умеренных волнениях обычно не превышают 0,6 м/с.

Наконец, непосредственно в приурезовой области и на пляже выделяется зона действия прибойного потока – сложного поступательного знакопеременного перемещения водных масс в зоне окончательного забурунивания.

С общеэнергетической точки зрения, наиболее интенсивное воздействие на дно происходит в зоне действия прибойного потока, несколько слабее оно в зоне забурунивания и самое слабое - в зоне начальной деформации волн.

Каждая из указанных гидродинамических зон приурочена к строго определенному участку береговой полосы: пляжу и различным участкам подводного берегового склона. Притом, как показал анализ многолетних наблюдений за изменениями профиля пляжа и подводного склона, распределение мощности активного слоя наносов (слой гидродинамической переработки) соответствует особенностям деформации волн на мелководье.

Изменение мощности активного слоя осадков по обобщенному профилю прибрежной зоны района исследований показано на рис. 3. За начало отсчета расстояний принята вершина авандюны, где совершенно исключается какое-либо воздействие волн, за урез воды – условная отметка, близкая к минимальным уровням малых вод.



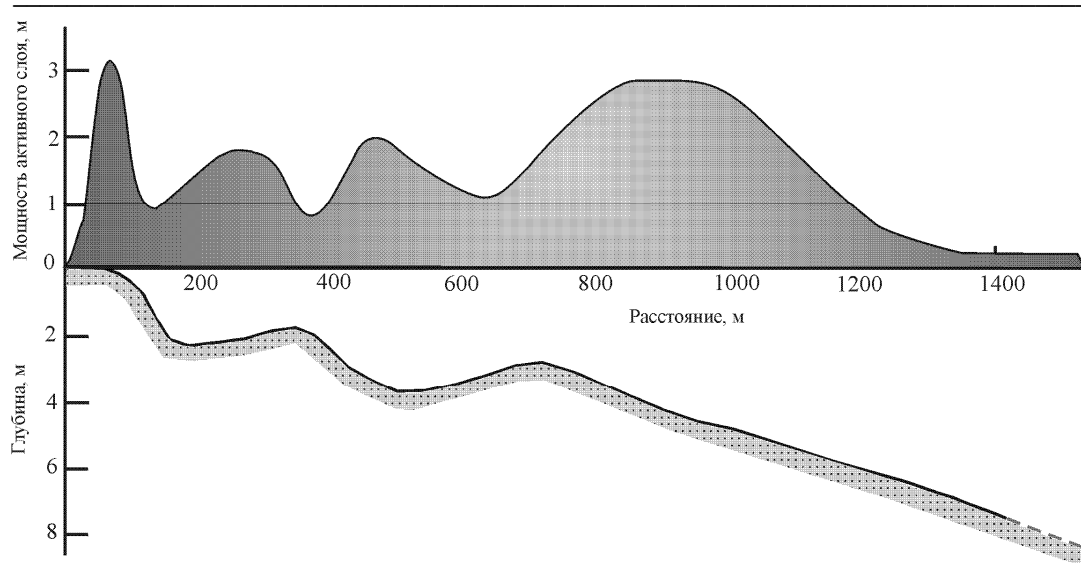


Рис. 3. Распределение мощности активного слоя наносов в прибрежной зоне северо-восточной части о-ва Сахалин

Отложения пляжа формируются прибойным потоком в наиболее активной гидродинамической среде. Не менее важно, что движение воды на пляже имеет возвратно-поступательный характер, что усиливает дифференцирующий эффект гидродинамики. Вся энергия прибойного потока расходуется на его взаимодействие с поверхностью пляжа, поэтому именно здесь наблюдается максимальная мощность активного слоя наносов (табл. 1).

Таблица 1

Максимальная мощность активного слоя наносов и площадь переработки грунта в различных гидродинамических зонах

Зоны	Расстояние от границ зоны до вершины авандюны, м	Максимальная мощность активного слоя, м	Площадь переработки грунта, м <sup>2</sup>
Зона начальной деформации волн (внешняя зона)	1300	0,2	Не вычислялась
Зона разрушения волн	150-1300	2,6	1610
Зона прибойного потока	0-15	3,2	185

Подводное продолжение пляжа – подводный береговой склон – начинается сразу ниже уреза воды и разделяется на две части. Первая, ближайшая к урезу и соответствующая зоне забурунивания волн, отличается тем, что здесь в процессе выработки профиля равновесия склона образуются характерные формы рельефа – подвижные подводные валы. Это гряды (две или три) высотой 1-1,5 м, ориентированные параллельно берегу. Над их гребнями движение воды наиболее интенсивно. Кроме того, здесь активно действуют разрывные течения, которые образуют желоба размыва, пересекающие подводный береговой склон до глубины 5-7 м и более. Желоба размыва часто создают значительные перепады глубин вдоль берега, что приводит к неодинаковой рефракции волн на смежных участках малой протяженности. В результате усложнения области развития подводных валов по силе воздейст-

вия волн на дно могут приблизиться к пляжевым. Максимальная мощность активного слоя в этой части подводного склона составляет 2,6 м.

Вторая часть подводного берегового склона расположена глубже и дальше в море, за пределами области разрушения волн, где дно резко выполаживается, валы пропадают, а остаются лишь знаки ряби. Она отвечает зоне начальной деформации волн (внешней зоне), которая со стороны берега морфологически ограничивается морским склоном внешнего подводного вала. С морской стороны заметных морфологических признаков ее границ, за исключением отсутствия микроформ данного рельефа, нет. Кратковременные (после отдельных штормов) изменения рельефа дна и характеристик поверхностных осадков здесь весьма незначительны. Невелики и многолетние изменения этих характеристик. Вместе с тем объемы наносов, переносимых по мористому краю береговой зоны, могут достигать значительных величин.

Количественные параметры зон, т. е. ширина и глубина расположения границ сильно варьируют. Они определяются уклоном дна, составом материала и особенно характеристиками волнения. На океанских берегах (к ним относится и северо-восточное побережье Сахалина) обычно сильнее расширяется внешняя зона подводного берегового склона, соответствующая деформации со стороны не только обычных ветровых волн, но и длиннопериодных океанских волн. Следует учитывать также приливные колебания уровня моря, величина которых в районе исследований достигает 2 м. Они вызывают периодическое смещение зон наиболее активного воздействия на дно. Если на неприливном море относительная высота волны и ее удельная энергия (при одних и тех же параметрах волнения) являются величинами постоянными, то на приливном море для данной точки профиля склона они меняются во времени. Таким образом, характер деформации волн и трансформации волновой энергии на приливном море более сложен, чем на неприливном.

### **Изменение рельефа береговой зоны**

Изучение изменений рельефа береговой зоны моря – одна из самых важных задач исследования динамики морских берегов. Особый интерес представляют наиболее общие закономерности преобразований подводного склона, которые проявляются всегда, независимо от той или иной физико-географической обстановки. Вместе с тем важную роль играют и кратковременные изменения, происходящие в результате одного шторма или ряда штормов, следующих друг за другом. Такие изменения часто оказываются обратимыми, не отражаются на эволюции данного участка берега, а потому не привлекают внимания исследователей. В то же время для нужд мореплавания, гидротехники и многих других отраслей хозяйственной деятельности именно эти изменения, происходящие порой неожиданно и обычно с большой скоростью, наиболее существенны.

Исследования изменений рельефа и осадков береговой зон проводилось по нескольким профилям (два основных и один дополнительный) на стационарной площадке, расположенной у северной косы лагуны Пильтун.

В результате обобщения данных натурных наблюдений удалось установить, что активность и направленность процессов преобразования рельефа верхней части береговой зоны северо-востока Сахалина определяется глав-

ным образом интенсивностью и структурой волнения, а также углом подхода волн к берегу. Основные преобразования рельефа происходят при действии трех волновых режимов: умеренных косых волнений с краткой фазой затухания, сильных косых волнений с краткой фазой затухания и умеренных волнений с длительной фазой затухания. Рассмотрим на конкретных примерах особенности изменений рельефа при действии указанных гидродинамических режимов. При этом отметим, что хотя приведенные примеры характеризуют специфику конкретных штормов, вместе с тем они отражают в целом и общие тенденции динамики рельефа дна, отличающие основные режимы волнения.

**Умеренные косые волнения с краткой фазой затухания.** В один из периодов наблюдения наблюдалось волнение средней интенсивности ( $h \approx 1,5$  м). Волны подходили с северо-востока под углом 50-60°. Фазы развития, стабилизации и затухания составили соответственно 35, 50 и 15%. Сопоставление данных промеров до и после волнения показало чередование на профиле участков размыва и аккумуляции (рис. 4а). Отмечается существенный размыв во фронтальной части пляжа и на подводных валах (особенно II и III), при этом эрозии подверглись главным образом мористые склоны валов, а наращивались бережные. В межвальных ложбинах шла аккумуляция. Во внешней зоне в рассматриваемый период гидродинамическое воздействие было малоэффективным. Наблюдалось первичное разрушение наиболее крупных единичных волн, а в основном шла незначительная деформация волн открытого моря при взаимодействии с дном. Такое, в целом индифферентное, гидродинамическое воздействие привело лишь к некоторому повышению рельефа дна за счет осаждения здесь обломочного материала, поступающего из зоны подводных валов в результате действия компенсационных течений.

Простое сопоставление показывает, что во внешней зоне площади аккумуляции лишь немного уступают площадям размыва. Очевидно, не весь рыхлый материала изымается с профиля, значительное его количество поступает из нижележащих областей в вышележащие. Иными словами, даже при косом волнении в этой части профиля идет активный процесс поперечного перемещения осадочного материала в сторону берега.

Иная картина наблюдается на пляже и в верхней части склона. Здесь площади размыва явно превышают площади аккумуляции. Особенно эта диспропорция заметна при сравнении площадей отрицательных и положительных деформаций в приурезовой ложбине. Количество поступающего с пляжа материала значительно превышает количество материала, аккумулирующегося в ложбине. Вместе с тем наблюдавшееся волнение было умеренным по силе и не могло сопровождаться сильными компенсационными течениями, которые выносили бы избыток осадочного материала. Несомненно, здесь перемещение обломочного материала происходило главным образом во вдольбереговом направлении. В период действия данного шторма за счет косою подхода волн к берегу имело место активное вдольбереговое течение, которое способствовало продольному перемещению осадков.

**Сильные косые волнения с краткой фазой затухания.** Наблюдалось волнение северо-восточного направления, при котором волны подходили к берегу под углом 55-65°. Высота волн достигала 2,8 м, а длина – 54 м. Фазы развития, стабилизации и затухания составили соответственно 45, 40 и 15%. После

действия шторма практически повсеместно наблюдался размыв, особенно хорошо выраженный на подводных валах: I подводный вал был размыв полностью (рис. 4б). Относительно небольшие положительные деформации рельефа (аккумуляция) имели место лишь в приурезовой ложбине и во внешней зоне.

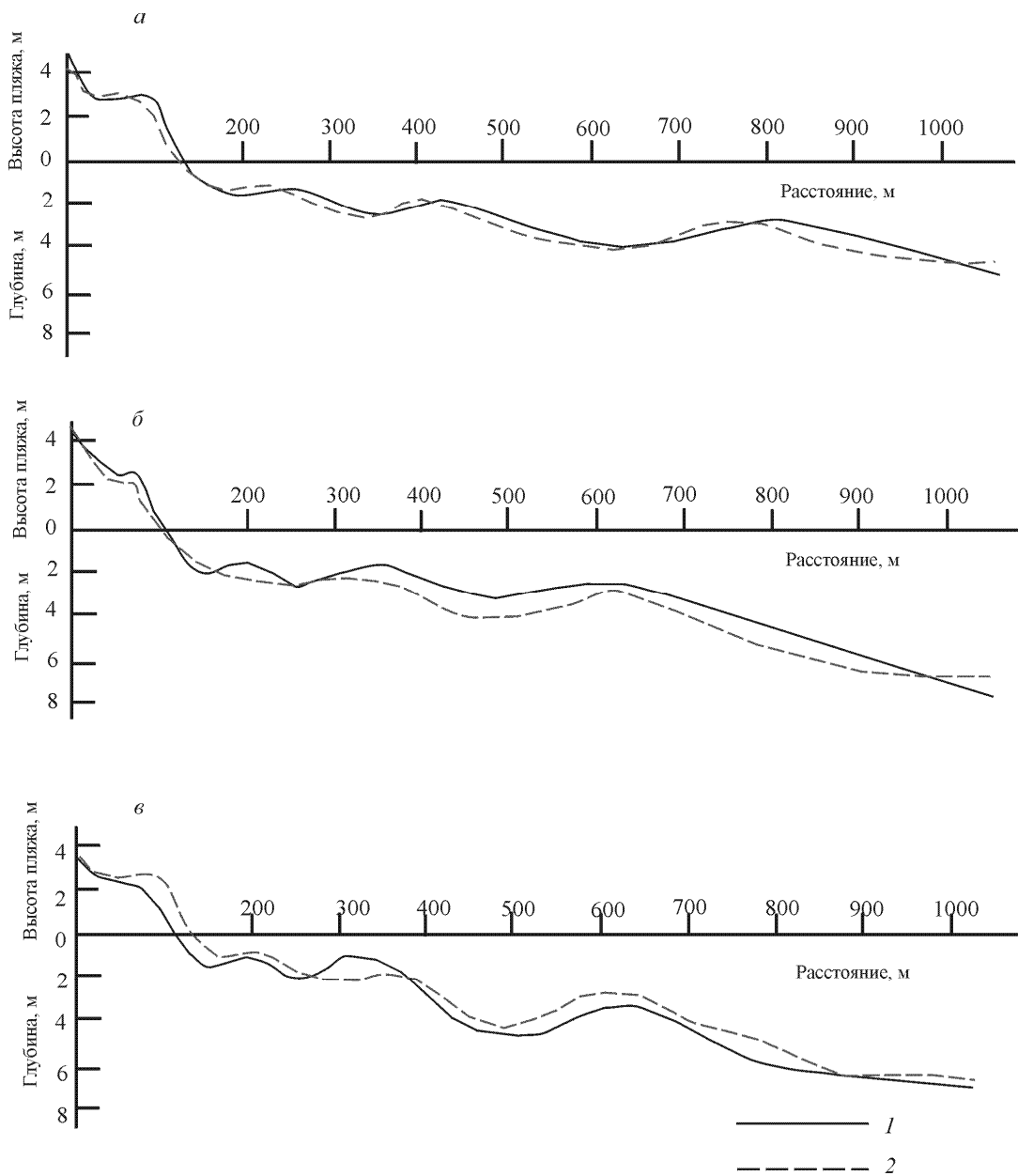


Рис. 4. Изменение профиля пляжа и подводного берегового склона при умеренном косом волнении с краткой фазой затухания (а), сильном косом волнении с краткой фазой затухания (б) и умеренном волнении с длительной фазой затухания (в). 1 – профиль до начала действия волнения, 2 – профиль после окончания действия волнения

На пляже во время действия данного волнения общая направленность и масштабы перестройки рельефа были практически такими же, как и в случае с умеренным волнением. Отличие состояло лишь в несколько более интенсивном размыве, который затронул в рассматриваемом случае не только фронтальную подзону, но и центральные части пляжа.

Практически повсеместные отрицательные деформации рельефа дна при относительно устойчивом положении отдельных морфологических элементов отражают преобладание в период действия данного волнения продольного перемещения обломочного материала в зоне подводных валов. На протяжении фаз развития и стабилизации шторма наиболее активными факторами, которые приводили к изменению профиля, были вдольбереговые течения, обусловленные косым подходом волн к берегу. Во время действия данного волнения на подводных валах были зафиксированы более высокие скорости вдольбереговых течений по сравнению с межвальными ложбинами.

**Умеренные волнения с длительной фазой затухания.** Сошлемся на пример конкретного волнения, когда волны подходили к берегу почти под углом  $90^\circ$ , а высота их достигала 2 м. Фазы развития, стабилизации и затухания составили соответственно 15, 35 и 50%. После действия волнения отмечалось повышение рельефа практически по всему профилю (рис. 4в). Наиболее заметная аккумуляция фиксировалась во фронтальной части пляжа, в приурезовой и межвальных ложбинах. На подводных валах (за исключением I вала) аккумуляция была не столь ярко выражена, более того, на II валу отмечались участки размыва.

Несомненно, что в период действия данного волнового цикла в верхней части береговой зоны существовали условия, благоприятные для аккумуляции осадочного материала. Об этом говорит значительное превышение площадей намыва над площадями размыва, т. е. налицо общее увеличение количества обломочного материала. При аккумуляции характерно повышение и выполаживание профиля пляжа и подводного берегового склона.

Поскольку волны подходили к берегу под прямым углом, осадочный материал испытывал главным образом поперечное перемещение. Судя по направлению смещения подводных валов, рыхлый материал перемещался к берегу. Вдольбереговое перемещение могло осуществляться лишь в виде отдельных незначительных подвижек в противоположных направлениях, которые не оказывали существенного влияния на рельефообразование. Таким образом, ведущий процесс, определивший особенности итоговых преобразований рельефа, - процесс поступления рыхлого материала в сторону уреза с нижележащих участков дна на вышележащие и далее вверх по профилю пляжа. Этот процесс, как отмечалось выше, характерен для фазы затухания волнения. Следы действия динамических факторов на ранних стадиях волнения (фазы развития и стабилизации) практически не сохранились, за исключением участков размыва на II подводном валу.

### **Динамика подводных валов**

Подводные валы и ложбины, которые образуются в процессе выработки профиля равновесия склона, являются хорошими маркирующими формами, позволяющими выявить общие и частные закономерности преобразования верх-

ней части береговой зоны. Поэтому наиболее важными представляются наблюдения за изменениями морфологии и местоположения этих форм на профиле.

На основании проведенных исследований установлено, что существуют определенные статистические закономерности для параметров подводных валов (табл. 2). Так, соотношения средних глубин над валами закономерно изменяются от I к II и от II к III: они увеличиваются примерно вдвое. Почти в таком же масштабе происходит возрастание от гребней валов до уреза воды. В той же пропорции изменяются параметры волн на мелководье. Это указывает на прямую связь морфологических параметров валов с условиями распространения волн на мелководье – их трансформацией и многократными разрушениями, количество которых зависит от параметров исходных валов, уклона дна и ширины зоны подводного берегового склона, а также от литологического состава донных осадков.

Таблица 2

Морфологические параметры (м) подводных валов береговой зоны северо-восточной части острова Сахалин

№ п/п	I вал				II вал				III вал			
	Глубина над валом	Расстояние до вала	Глубина над ложбиной	Расстояние до ложбины	Глубина над валом	Расстояние до вала	Глубина над ложбиной	Расстояние до ложбины	Глубина над валом	Расстояние до вала	Глубина над ложбиной	Расстояние до ложбины
1	0,9	80	1,7	50	2,0	215	2,6	170	4,2	520	5,0	440
2	1,0	110	1,3	70	2,2	220	2,8	180	4,3	530	4,20	
3	1,1	95	1,8	60	2,5	245	3,1	200	4,6	560	5,6	460
4	1,3	115	1,6	90	2,6	265	3,4	20	4,8	630	5,30	
5	Нет данных	Нет данных	1,3	100	2,5	270	3,0	230	4,4	610	5,0	480
6	1,3	145	1,4	85	2,4	290	3,1	200	5,0	640	5,5	510
7	1,0	100	1,3	70	3,0	290	3,4	220	5,2	640	5,6	540
8	Нет данных	Нет данных	1,5	110	2,7	285	3,2	220	5,0	630	5,4	500
9	Вал не выражен				2,2	290	2,5	220	4,4	560	5,3	460
10	Вал не выражен				2,1	290	2,6	215	4,2	555	5,0	450
11	1,2	105	1,4	70	2,2	265	3,0	200	4,1	565	4,9	420
12	Вал не выражен				2,5	285	3,1	210	4,8	600	5,3	500
13	Вал не выражен				2,6	305	3,3	240	5,5	620	6,0	500
14	1,0	90	1,2	60	2,4	270	3,0	230	4,6	555	5,4	460
15	Вал не выражен				2,4	245	3,2	200	5,1	580	6,0	460
16	Вал не выражен				2,5	250	3,5	140	4,5	540	5,4	420
17	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	2,6	235	3,3	160	5,2	600	5,7	500
18	1,2	95	1,7	65	2,5	280	3,2	220	5,2	545	5,6	490
19	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	2,3	230	2,9	140	4,6	545	5,3	480
20	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	2,2	260	3,6	180	4,7	580	5,0	430
21	1,2	15	1,5	90	2,7	300	3,3	240	5,1	610	5,5	510
22	0,9	95	1,1	60	2,1	265	2,7	190	4,6	560	5,2	470
23	1,1	105	1,45	75	2,4	260	3,1	200	4,7	575	5,4	460

Такие же соотношения глубин над валами и расстояний от валов до уреза наблюдаются в других акваториях [7, 8, 9]. При этом параметры могут большими или меньшими, но их соотношения в целом не изменяются. Это

еще раз подтверждает, что параметры валов определяются спецификой трансформации волн.

Анализ имеющихся материалов позволяет сделать некоторые общие выводы относительно динамики подводных валов.

1. Валы подвижны и перемещаются главным образом к берегу. При этом I (от уреза) вал часто причленяется к пляжу, II становится первым, III – вторым и т. д., а на мористой части склона во время сильных штормов зарождается новый вал. Таким образом, существует своеобразный «конвейер» валов. Однако перемещение валов к берегу происходит довольно медленно и не всегда последовательно. Полный цикл смещения совершается не в течение одного шторма, месяца или даже сезона, а за более длительный период времени – за год или даже ряд лет.
2. Валы редко перемещаются в сторону моря. Такое происходит только во время сильных штормов со значительным нагоном волн, когда благодаря действию, прежде всего, различного рода компенсационных течений гребни валов или весь вал могут сместиться в сторону моря; при этом разрывные течения иногда расчленяют валы. Значительно чаще наблюдается только размыв валов, сопровождаемый понижением высоты, расширением основания, углублением межвальных ложбин и смещением гребней в сторону моря.
3. Валы перемещаются по фронту неравномерно: на одних участках быстрее, на других медленнее, на третьих практически остаются на месте. Против бухточек размыва валы изгибаются в сторону моря и только на прямолинейных участках сохраняют примерно параллельное расположение относительно береговой линии.
4. При слабых и умеренных волнениях происходит эрозия мористых и наращивание бережных склонов, и валы, таким образом, смещаются в сторону берега. Скорость перемещения валов при этом различна – от 1-2 м до нескольких метров в сутки. При сильных (штормовых) волнениях с кратковременной фазой затухания валы размываются: высота уменьшается, основание расширяется, форма часто становится асимметричной (с крутым склоном со стороны моря), межвальные ложбины углубляются. Сами валы либо остаются на месте, либо смещаются на первые десятки метров в сторону моря.
5. Морфология и положение валов зависят от сезона, поскольку сильные штормы характерны для осеннего периода, а умеренные и слабые волнения фиксируются главным образом в летний период. Летом валы не полностью сформированы и располагаются далеко от уреза. В конце лета и начале осени их морфология приобретает окончательный вид, и находятся они еще ближе к берегу. В конце осени штормы значительной силы с кратковременной фазой затухания волнения могут снова отдалить их от линии уреза. В основном эти же штормы определяют положение и характер валов к началу лета, в осенне-зимний период из-за ледового покрова заметных изменений в системе подводных валов не происходит.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Усенков С. М. Структурно-минералогические особенности осадков и морфологии пляжей северо-восточной части о-ва Сахалин // Вестн. Ленингр. ун-та. - Сер.7: Геология, география. - 1985. - №7. – С. 87–90.
2. Усенков С. М. Фации прибрежной зоны северо-востока Сахалина. Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. 7: Геология, география. - 1990. - Вып. 1 (№7). – С. 3-9.
3. Усенков С. М. О реконструкции особенностей прибрежно-морской среды седиментации с использование динамических Диаграмм // Океанология. - 1992. -Вып. 1. - Т. 32. – С. 159-165.
4. Усенков С. М., Барков Л. К. Морфоседиментогенез прибрежной зоны северо-востока Сахалина. – СПб: Изд-во С.-Петербурга. ун-та, 1995. - 136 с.
5. Айбулатов Н. А. Динамика внешней части береговой зоны в связи с вопросами седиментогенеза на шельфах бесприливных морей // Морфолитогенез и позднечетвертичная история прибрежно-шельфовых зон/ Под ред. А. А. Аксенова. - М., 1978. - С. 145-176.
6. Долотов Ю. С., Жаромский Р. Б., Кирлис В. И. Дифференциация осадочного материала и слоистость прибрежных отложений. -М., 1982. - 184 с.
7. Баском В. Волны и пляжи / Пер. с англ. - Л., 1966 . 279 с.
8. Кнапс Р. Я. О некоторых закономерностях развития подводных песчаных валов// Исследования изменений рельефа дна прибрежной зоны моря / Под. ред. В. В. Лонгинова. - М.: Наука, 1959. - С. 103-124.
9. Логвиненко Н. В., Барков Л. К., Матвеев Е. А. К вопросу о динамике подводных песчаных валов // Вестн. Ленингр. ун-та. – Сер. 7: Геология, география. - 1981. - №12. – С. 12-20.



---

# ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОРЕПЛАВАНИЯ

---

ГРНТИ 37.25.23

## **ОКЕАНИЧЕСКОЕ ЛУННО-СОЛНЕЧНОЕ ПРИЛИВНОЕ ВРЕМЯ**

**А. И. ДУВАНИН**  
(МГУ)

*По аналогии со шкалой времени солнечного года обоснована шкала предлагаемой системы океанического приливного лунно-солнечного времени. Выведена простая зависимость для перевода дат в солнечном времени в отметки приливного года. Этим обеспечивается связь между временем континентальным (солнечным) и океаническим (приливым).*

Ориентация человечества во времени развивалась в зависимости от колебаний солнечной радиации и опосредованных ими периодических процессов в земных средах. В форме фундаментального обобщения это выражено в системе солнечного времени. Физическая суть этой системы заключена в шкале периодов (частот) обусловленных солнцем колебаний в живой и неживой природе.

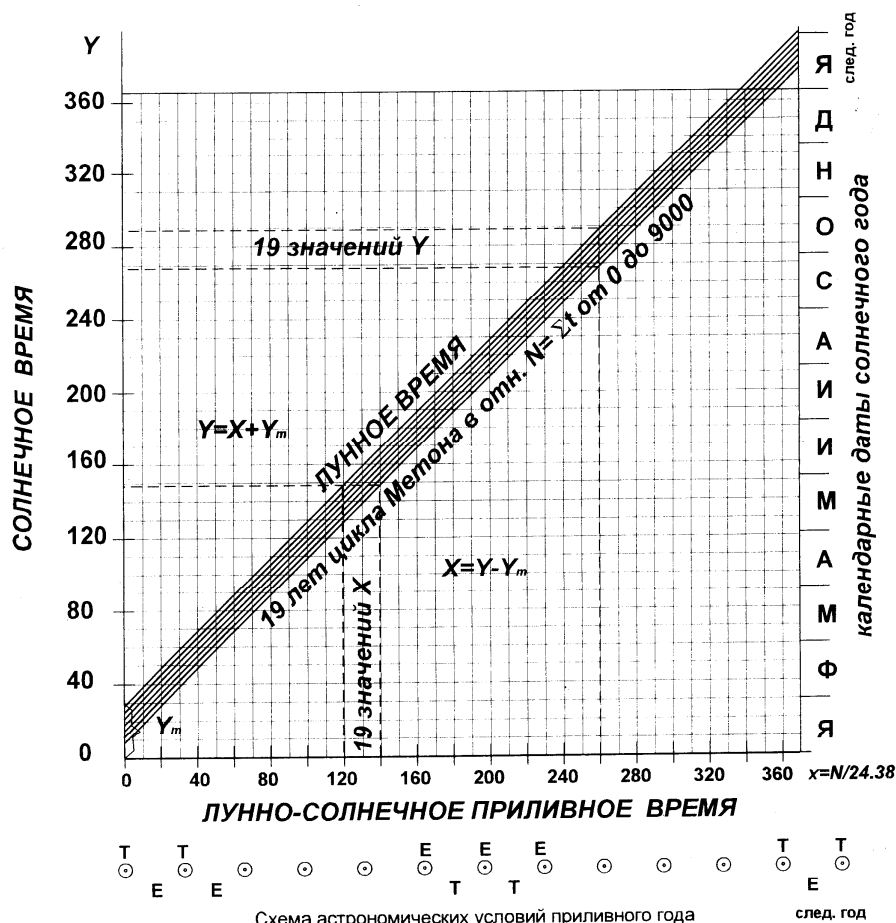
Солнечное время, воспринимаемое как всеохватывающее, всё же не универсально. В его шкале нет частот, генерируемых приливообразующими силами в Мировом океане и других оболочках Земли (твёрдая кора, верхние слои атмосферы, магнитосфера). Эти процессы долго оставались незамеченными цивилизацией, развивавшейся на континентах, поэтому естественным образом оказались вне восприятия в качестве фактора времени.

Современное общество всё активней обращается к природе океанов, где динамика процессов и органический мир подчинены ритмике приливов. В этой среде нельзя признать оптимальным приложение солнечного времени для понимания всего, что там развито и сосуществует.

В океанах согласованность между динамикой приливов и возмущениями в среде заметно отличается от имеющейся на материках. Поэтому регистрации приливов в солнечном времени не имеют самого ценного свойства - именно информативности о повторяемости фиксированного явления. Приливные колебания, записанные приборами в аномальном для их природы времени, оказываются зашифрованными для непосредственного анализа. Связанные с этим познавательные трудности преодолены путем выражения наблюдений рядами гармонических колебаний. Различной точности аппроксимации фактов реальной динамики приливных явлений стали содержанием весьма развитых в этой области эмпирических исследований. В следовании

от фактов к аппроксимациям и от них к выводам есть непоследовательность. Она предопределена противоречием между природой процесса и системой времени, которая в этом случае исторически не могла быть иной.

Понятие солнечного времени сложилось в результате человеческой деятельности в континентальных условиях, поэтому к нему привязана и вся океанографическая информация. Насколько это оправдано в среде, охваченной другим режимом колебаний, столь же постоянных, как солнечные? Как в этих условиях надо понимать течение времени? Такие вопросы остались без внимания морской науки и практики. Для автора они стали осязаемыми и впервые были поставлены в монографии [1].



- Условные обозначения
- ☉ - новолуние, время сизигийных приливов
  - Т - Луна в больших склонениях, время тропических приливов
  - Е - Луна в плоскости экватора, время равноденственных приливов
  - Y - число суток от начала года
  - X - число приливных суток от начала приливного года
  - $Y_m = Y - X$  - число суток между солнечным и приливным временем
  - t - время кульминации Луны на меридиане Гринвича в градусах

Большую ясность в ход рассуждений привнесло осознание понятия приливного года с частотной функцией, отвечающей годовому спектру колебаний

в океанах [2]. Астрономические признаки границы между приливными годами выражены наблюдающимся в январе совпадением больших по тропическому неравенству суточных приливов с большими по фазовому неравенству полусуточными приливами. Соответствующие граничным отметкам промежуточные соотношения между названными неравенствами показаны на схеме астрономических условий приливного года в нижней ее части (см. рисунок). В Мировом океане этому лунно-солнечному циклу соответствует годовой диапазон суточных приливных колебаний. Они обозначены вдоль оси X по смыслу кодовыми отметками, которые аналогичны датам солнечного года.

Анализ наблюдений над приливами в границах приливного года открыл ранее не описанные свойства приливных режимов. В привязке ко времени кульминации Луны в материалах наблюдений, совмещённых по начальным отметкам приливных лет, обнаружилось хорошо выраженное подобие в суточном ходе приливов. Вместе с тем ряды лунного времени, показанные на рисунке диагональными прямыми, оказались меняющимися по известному в астрономии 19-летнему циклу Метона.

Эти закономерности в приливах позволили наглядно выразить систему приливного лунно-солнечного времени. Она показана графически на рисунке в координатной плоскости гражданского солнечного года (вертикальная шкала Y) и приливного года (горизонтальная шкала X). В пределах небольшого расстояния между двумя крайними наклонными графиками лунного времени надо иметь в виду остальные 17 подобных же линейных функций цикла Метона, различающихся по начальным отметкам  $y_m$ . Значения этих отметок на 19 лет приведены в таблице вместе с данными о продолжительности приливных лет. Графическое построение позволяет убедиться, что для каждой даты солнечного времени можно найти соответствующую дату приливного времени в 19-летнем цикле Метона.

В целом приведённый график составлен для показа возможности выявления одинаковых по суточному режиму приливов в лунно-солнечном времени приливного года и в гражданском солнечном времени с помощью промежуточной системы лунного времени для 19 лет цикла Метона. Поскольку этот цикл невозможно с надлежащей подробностью отразить в графике связи систем времени, то практическое определение дат одинаковых приливов надо вести с помощью указанной на рисунке формулы:  $X=Y-Y_m\dots[1]$ .

Обратимся к примеру использования этой формулы. Предположим, что в некий год M (см. таблицу) и дату Y солнечного времени произошли сложные события, для анализа которых надо с возможной полнотой восстановить совокупность менявшихся на момент Y особенностей динамики приливов, в том числе и такие подробности, которые полностью оставались без внимания.

Возможность повторного прослеживания хода процессов заложена в шкале приливного лунно-солнечного времени, где каждая отметка X отвечает ежегодному повторению приливных режимов в течение 19 лет цикла Метона. Необходимая отметка X определяется для даты Y по формуле (1). Чтобы ею воспользоваться, надо из таблицы выбрать по году M значение  $Y_m$ , отвечающее числу суток, на которое приливное время опаздывает относительно солнечного времени.

Соответствие лет в циклах Метона\*

М					Y <sub>m</sub>	Y' <sub>m</sub>	d
1916	1935	1954	1973	1992	19	4	355
17	36	55	74	93	7	7	369
18	37	56	75	94	13	-2	369
19	38	57	76	95	16	1	369
20	39	58	77	96	20	5	368
21	40	59	78	97	24	9	369
22	41	60	79	98	27	12	354
23	42	61	80	99	17	2	369
24	43	62	81	2000	21	6	369
25	44	63	82	01	25	10	368
26	45	64	83	02	28	13	369
27	46	65	84	03	19	3	355
28	47	66	85	04	22	7	368
29	48	67	86	05	26	11	369
30	49	68	87	06	29	14	355
31	50	69	88	07	18	3	369
32	51	70	89	08	22	7	354
33	52	71	90	09	13	-2	369
34	53	72	91	2010	15	0	368

Согласно рисунку полученная ордината X пересекает 19 наклонных графиков лунного времени, от которых по шкале солнечного времени Y можно определить даты для каждого цикла Метона, когда будет повторяться приливной режим, наблюдавшийся в момент анализируемых событий.

Ссылка на рисунок сделана только с целью графической иллюстрации рассуждений. В действительности, после выявления отметки приливного времени X определение повторного хода приливов на любые годы и даты в будущем или прошедшем времени ведётся по зависимости  $Y=X+Y_m$ , где  $Y_m$  надо выбирать из той же таблицы по году, если необходимо вернуться к событиям, определенным в солнечном времени.

Столь подробный обзор простых действий представляется не лишним для ориентации в предлагаемой системе приливного времени в разнообразных обстоятельствах, которые могут встретиться в практической жизни.

Обобщенная информация о повторяемости приливов сосредоточена в таблице с показом 5 циклов Метона. В вертикальных столбцах перечислены 19 лет каждого цикла с разными годовыми режимами приливов. Горизонтальные строки таблицы образованы годами с наиболее точно повторяющимися через интервалы в 19 лет приливными колебаниями.

Эти годы одинаково смещены относительно 1 января на число суток  $Y_m$ . Они одинаковы также по продолжительности d.

\* В шкале приливного года можно менять условное место нулевой отметки оси X относительно нуля оси Y, если это по каким-либо причинам желательно сделать в отличие от показанного на рис. 1 совмещения нулевых отметок оси X, Y. В частности сдвиг шкалы приливного года (X) на 15 суток влево относительно начала солнечного года (Y) сводит к минимуму различие между солнечным и приливным временем. Этот  $Y'_m$  вариант предпочтителен, в частности, при поиске слабо выраженного или предполагаемого участия приливов в рядах дополнительных регистраций процессов. Отметки  $Y_m$  всё же показаны, поскольку использовались после первой публикации [1].

d - продолжительность приливного года;  
M - годы циклов Метона в сутках.

В случае совмещения регистрации приливов за разные приливные годы по характеристике  $Y_m$  в материале обнаруживается выраженная повторяемость режимов колебаний, уступающая по точности совпадению рядов в 19-летних интервалах времени.

Главный научный и практический результат использования системы приливного времени состоит в определении сдвига времени приливов в пределах приливного года на постоянное число суток  $Y_m$  относительно солнечного года.

В упрощениях, принятых при построении шкалы приливного года, совпадения разновременных приливов вероятны с точностью в пределах  $\pm 1$  сутки или  $\pm 1$  час в моментах высоких полных и низких малых вод. Эта оценка точности предварительная. Тем не менее, она приемлема для согласования по фазе приливов повторных океанографических и гидрографических наблюдений для привязки их к приливному времени.

Впервые массовая переработка по этому принципу информации о приливах в основных портах Мирового океана была издана в виде комплекта таблиц приливов постоянного действия в 1960 г. С использованием ЭВМ подобный анализ длительных мареографических материалов мог бы дать основу для особо точной прогнозной информации о колебаниях уровня моря.

Заметим, что влияние 19-летнего лунно-солнечного цикла Метона на земные среды было предметом исследований многих авторов. Обзор полученных данных о проявлениях таких колебаний в циркуляции океанов и атмосферы приведён в монографии «Океан и Космос» [3]. Там же упоминается об обнаружении приливных ритмов в колебаниях влажности, температуры, в приросте древесины и в отложениях ленточных глин.

Большое разнообразие фактов опасных ситуаций, аварий и других явлений с участием приливов сосредоточено в архивах, лоциях и в памяти людей, посвятивших жизнь морской стихии. Фиксированное время подобных событий, дополненное отметками приливного времени, принципиально меняет значимость информации, она приобретает историческую ценность поскольку раскрывает 19-летнюю повторяемость когда-то случившегося. Это порой не только интригующе интересно, но может учитываться практически.

В науке о морских приливах самая сложная проблема состоит в объяснении распространения приливных волн по пространству морей и океанов. Известна обширная научная литература с эмпирическими, полуэмпирическими и очень строгими физико-математическими решениями, начало которым положено Лапласом. Конечные результаты таких работ всегда выражены котидальными картами с изолиниями, показывающими распространение гребня приливных волн. Математики при этом тщательно оговаривают, каким частным компонентам приливов и принятым упрощениям задачи отвечают решения.

В результате измерений колебаний свободной поверхности океанов, которые достигли в последнее время поразительной точности, получен значительный прогресс в познании движения приливных волн. Стало возможным построение карт реальной динамики приливов на открытых морских акваториях в размерности, идентичной прибрежным мареографическим регистрациям уровня моря. Это весьма точное слежение за изменениями фазы приливов, которое по отметкам гребня приливной волны освещается котидальными ли-

ниями. Сопряжение таких линий с режимом приливов у уреза воды актуально для познания динамики вод в особо сложных прибрежных условиях.

Очень интересны первые результаты компьютерного анализа спутниковых регистраций движения приливных волн на открытых морских акваториях, полученные Ю. Н. Жуковым.

### **Резюме**

Сложные по изменчивости приливные колебания влияют на состояние всех характеристик океанической среды. Только путем непосредственной регистрации приборами в системе солнечного времени ведутся исследования приливных явлений. При этом не принято разъяснять, что информативность полученного материала не выходит за пределы года из 19-летнего цикла, когда велись наблюдения.

В статье описано приливное время, свободное от межгодовой изменчивости по циклу Метона. Выведена простая формула, связывающая две системы времени. Соблюдение определенной последовательности перевода наблюдений между системами времени позволяет предвычислять ход приливов без предварительного гармонического анализа наблюдений и последующего синтеза ряда гармонических составляющих прилива.

Подобная возможность работы с приливными наблюдениями никем не представлялась.

Время признано физиками и философами неисчерпаемой проблемой познания. По мысли А. Эйнштейна «время надо понимать всегда относительно чего-то». Именно так относительно солнечного времени выведена поправка для перевода информации в приливное время. Простая связь между шкалами двух систем времени и подобие в их строении свидетельствуют об участии приливных явлений в принятой цивилизацией концепции земного времени в зависимости от космических сил.

Солнечная радиация и приливообразующие силы в континентальных и океанических средах определяют различное проявление времени, которое в целом едино для Земли.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Дуванин А. И. Приливы в море. Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 390 с.
2. Дуванин А. И. Приливной год и системы времени // Вестник МГУ. 1999. - сер. V, февраль. – С. 8-12.
3. Максимов И. В., Саруханян Э. И., Смирнов Н. П. Океан и Космос. Л.: Гидрометеиздат, 1970. - С.82-90.

**АРТЕФАКТЫ ЦИКЛИЧНОСТИ ЧАСОВЫХ СИСТЕМ****Ю. Н. ЖУКОВ**  
(ГНИНГИ МО РФ)

*Применение циклических часов приводит к двум артефактам в наблюдаемом процессе: периодичность – непериодичность и степень хаотичности.*

В данной работе рассматриваются искусственно вызываемые свойства или факты (артефакты), определяемые циклическим характером систем измерения времени (часов) и приписываемые изучаемому объекту. Такие артефакты возникают в любой предметной области естествознания в процессе анализа временных измерений, особенно в геофизических исследованиях.

Исторически термин возник в биологии, где он означает образования или процессы, возникающие при исследовании биологического объекта вследствие воздействия на него самих условий исследования. В физико-математических исследованиях к артефактам относятся явления, связанные с координатным методом изучения процессов. Например, к ним относится "феномен расширения Вселенной", наблюдаемый в эквидистантных и родственных им координатах. В бельтрамиевых координатах возникает артефакт "горизонта". "Горизонт" – это граница собственной вселенной для частицы, принятой за ось темпорат. В координатном же представлении горизонт трактуется как нечто, присущее самой кинематике. Очевидным артефактом является "скорость", определенная координатно. Наконец, к артефактам относятся все утверждения о функции смещения спектра (точнее, "доплеровской скорости") от расстояния [1]. Покажем, что артефакты с необходимостью возникают при анализе любых временных рядов измерений. Это связано с циклическим характером используемых часов.

В любых измерениях временных процессов применяются какие-либо часы для хронологической упорядоченности моментов измерений. Любые часы естествознания основаны на физических процессах – конструкциях с упругими и гравитационными маятниками, на астрономических системах, фиксирующих вращение Земли вокруг оси или вокруг Солнца, цезиевых или иных источниках электромагнитных колебаний и т.д. Для создания часов используется свойство периодичности этих процессов. Все процессы, изучаемые в естествознании, имеют менее периодический характер, чем процессы, используемые для часов.

Рассмотрим, какое влияние оказывает циклический характер часов на изучаемый процесс. Пусть для простоты изучается некоторый периодический процесс  $q$  с частотой  $\omega_0$  и единичной амплитудой. Процесс представлен измерениями, моменты проведения которых определяются часами с частотой  $\omega_c$ . В фазовом пространстве поведение такого процесса представляет собой устойчивый предельный цикл. Для содержательного анализа существования артефактов перейдем в "расширенное фазовое пространство", в котором введена новая независимая переменная, связанная с циклическим характером часов. В этом пространстве исследуемый  $q$  в каждый фиксированный

момент времени является функцией двух частот  $q(t)=q(\omega_0 t, \omega_\tau t)$ . В каждый момент времени  $t$  значение процесса  $q(t)$  является функцией двух независимых переменных: фазы изучаемого процесса  $\varphi_0(t)=\omega_0 t$  и фазы часов  $\varphi_\tau(t)=\omega_\tau t$ , представляющих собой координаты фазового пространства. Наглядно представить себе движение точки  $q(t)$  можно на поверхности двумерного тора. При таком представлении можно определить кинематические свойства траектории  $q(t)$  на торе. Они определяются отношением частот  $\omega_0$  и  $\omega_\tau$ . Если отношение частот рационально, то траектории  $q(t)$  образуют только отдельные линии на торе (рис. 1).

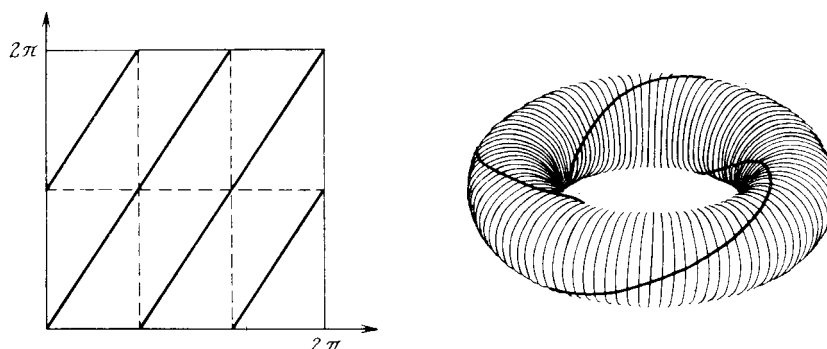


Рис. 1. Траектория процесса  $q(t)$  на плоскости и ее образ на торе при  $\omega_0:\omega_\tau=3:2$ . Траектория выходит из начальной точки  $\varphi_0=0, \varphi_\tau=0$ . Условие периодичности позволяет продолжить ее после того, как она достигнет уровня  $\varphi_\tau=2\pi$ , проектируя ее на ось  $\varphi_\tau=0$  (вертикальные штриховые линии). После того как траектория достигнет точки  $\varphi_0=2\pi, \varphi_\tau=\pi$ , пользуясь периодичностью, проектируем ее в точку  $\varphi_0=0, \varphi_\tau=\pi$  (горизонтальная штриховая линия), откуда она продолжается дальше (сплошная линия). В результате построения получаем замкнутую линию (противоположные края квадрата попарно отождествлены)

Если отношение частот иррационально, то траектории заполняют всю поверхность тора (рис. 2).

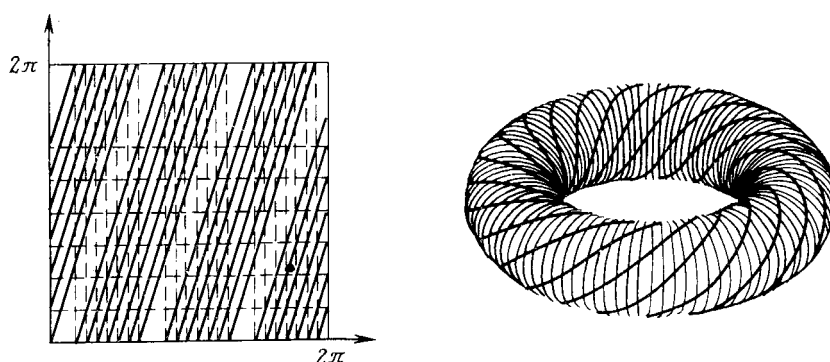


Рис. 2. Траектория процесса  $q(t)$  на плоскости и ее образ на торе при иррациональном отношении частот:  $\omega_0:\omega_\tau=\pi:1$ . Ни траектория на плоскости  $\varphi_0, \varphi_\tau$ , ни ее образ на торе не замыкаются и заполняют всю плоскость и весь тор. Показаны лишь несколько первых витков траектории, поскольку в противном случае она заполнила бы весь квадрат, а ее образ – весь тор



Из анализа траекторий на фазовой плоскости следуют нетривиальные выводы.

Один и тот же процесс может быть и периодическим, если его собственная частота соизмерима с частотой часов, и непериодическим, если его собственная частота несоизмерима с частотой часов. Если изменять частоту используемых часов, то характер периодичности исследуемого процесса будет изменяться. Следовательно, свойство периодичности (или непериодичности) процесса является артефактом циклического характера часов.

Если измерения процесса проводились с использованием часов с некоторой частотой (на практике, обычно используется среднесолнечное время), то переход к часам с другой частотой осуществляется простым пересчетом моментов измерений. Эта операция называется реградуировкой часов и не противоречит никаким законам кинематики [1].

Существуют естественные ограничения, накладываемые на возможность перехода к часам с частотой, соизмеримой с собственной частотой процесса. Это относится к процессам с иррациональными частотами. Численные вычисления осуществимы только на множестве рациональных чисел. Поэтому невозможно перейти к часовой частоте, соизмеримой с иррациональной частотой процесса. Но это уже относится к артефактам применения действительных чисел.

Возвращаясь к артефактам часов, согласно второму принципу термодинамики или другим аналогичным законам в природе никакой процесс не является абсолютно периодическим. Реальные процессы имеют ритмический характер. При наличии малых возмущений в фазе и амплитуде исследуемого процесса динамика его траекторий в расширенном фазовом пространстве описывается теорией Колмогорова-Арнольда-Мозера (КАМ) [2].

В теории анализ поведения траекторий в фазовом пространстве проводится с помощью метода секущей поверхности Пуанкаре (рис. 3).

В КАМ-теории показано, что под действием возмущений на сечении Пуанкаре появляется  $2ks$  неподвижных точек, из которых  $ks$  точек являются эллиптическими, а  $ks$  - гиперболическими. Здесь  $s$  - число витков, совершаемых траекториями,  $k$  - определенное целое число. Эллиптические неподвижные точки соответствуют устойчивым периодическим орбитам, каждая из которых окружена инвариантными (нерезонансными) торами, проявляющимися на отображении Пуанкаре в виде замкнутых кривых. Совершенно иная ситуация возникает в случае гиперболических неподвижных точек. Вследствие неустойчивости соответствующих периодических орбит в окрестности таких точек развивается исключительно сложная структура,

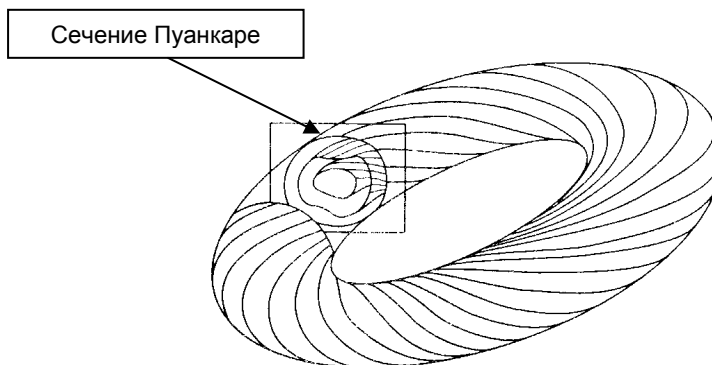


Рис. 3. Тор и его сечение Пуанкаре плоскостью [3]

что по существу обусловлено особой конфигурацией сепаратрис. Точнее, на отображении Пуанкаре эти сепаратрисы изгибаются и пересекаются в бесконечном числе точек, известных под названием гомоклинических точек. В этих областях возникает режим чрезвычайно иррегулярного движения – траектории очень чувствительны к малым изменениям начальных условий и замысловато бродят по широким областям фазового пространства. На отображении Пуанкаре это проявляется в виде облака, по всей видимости, случайно разбросанных точек, несмотря на то, что соответствующие траектории, естественно, абсолютно детерминированы. Отметим, что структура отображения Пуанкаре повторяется на всех масштабах вблизи всех эллиптических точек, порождаемых различными резонансными орбитами (рис. 4). Это замечательное свойство "самоподобия" (скейлинговый или фрактальный закон изменчивости).

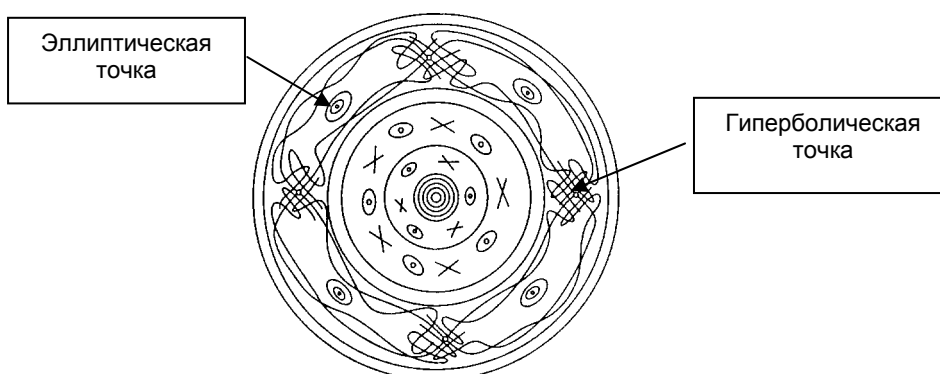


Рис. 4. Эллиптические и гиперболические точки на сечении Пуанкаре [3]

С ростом энергии системы наблюдается тенденция к отступлению островов, и хаотические траектории заполняют все более обширные участки фазового пространства. Это приводит к возникновению странных аттракторов. Существуют несколько сценариев возникновения странных аттракторов из квазипериодического движения [2].

В соответствии с выводами КАМ-теории связь между частотами исследуемого процесса и часов должна быть достаточно «иррациональной» для того, чтобы квазипериодическое движение продолжалось при наличии возмущений. В нашем, рассматриваемом для иллюстрации, случае с двумя степенями свободы это означает, что отношение частот  $\omega_0/\omega_t$  должно отличаться от рационального значения на величину:

$$\left| \frac{\omega_0}{\omega_\tau} - \frac{r}{s} \right| > \frac{c}{s^\nu} \quad (\text{для всех целых } r \text{ и } s). \quad (1)$$

Здесь  $c$  - малое число, обращающееся в нуль в отсутствии возмущений, а  $\nu$  достаточно велико (например,  $\nu=2,5$ ). В аналитической механике доказывается, что виды движения, допускаемые соотношением (1), составляют большинство видов движения, реализуемых в фазовом пространстве.

Из (1) следует, что если изменять частоту часов, то степень наблюдаемых возмущений во временном ходе наблюдаемого процесса будет меняться. Следовательно, можно утверждать, что некоторая доля возмущений, на-

блюдаемых во временном ходе измеренного процесса, является артефактом циклического характера часов.

Заметим, что обычно используемое при анализе временных рядов линейное время является разверткой циклического времени часов. Этот переход называется датировкой моментов измерения и ничего не меняет в характере исследуемого процесса. Он меняет только отношение порядка моментов измерения. В циклических часах моменты измерения упорядочены в соответствии с отношением локального следования, а в линейном времени отношением строгого порядка [1].

Таким образом, установлено, что применение циклических часов приводит к двум артефактам в исследуемом процессе: периодичность – непериодичность и степень хаотичности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пименов Р. И. Пространства кинематического типа (математическая теория пространства-времени). - Л.: Наука, 1968. - 496 с.
2. Шустер Г. Детерминированный хаос. - М.: Мир, 1988. - 240 с.
3. Арнольд В. И., Авец А. А. Эргодические проблемы классической механики. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 1999. - 281 с.

ГРНТИ 37.25.23

#### **АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ПРИЛИВНЫХ КАРТ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ФУНКЦИЙ КОМПЛЕКСНОГО ПЕРЕМЕННОГО**

**Ю. Н. ЖУКОВ**  
(ГНИНГИ МО РФ),  
**Е. В. ФЕДОРОВА**  
(ГОИН)

*Предлагается принцип построения приливных карт, позволяющий рассчитывать эти карты на ЭВМ по заданным значениям гармонических постоянных по контуру акватории.*

В настоящее время приливные карты строятся на основе метода Тимонова [1]. В основе этого метода лежит кинематический анализ гармонических постоянных, рассчитанных для береговых пунктов наблюдений за приливами. При построении приливных карт для больших акваторий с малым числом пунктов наблюдений, например для Арктического бассейна, возникают значительные трудности в построении изофаз и изоамплитуд на акватории. Кроме того, трудности возникают и при построении изофаз для акваторий, в которых расположено несколько амфидромических точек. Предлагается принцип построения приливных карт, позволяющий рассчитывать эти карты на ЭВМ на основе заданных значений гармонических постоянных по контуру акватории.

Формулировка задачи. Пусть задана некоторая односвязная (без островов) акватория с контуром  $C$  (рис. 1).

Рис. 1. Односвязная (без островов) акватория с контуром  $C$ .



В приливных исследованиях любая гармоника задается своими характеристиками: амплитудой  $A$ , специальным углом положения  $g$  ( $A$  и  $g$  называются гармоническими постоянными) и периодом  $T$ . Пусть известно распределение гармонических постоянных по всему контуру акватории. Для каждой гармоники заданы значения амплитуды и фазы во всех точках контура. На основе этой информации необходимо получить карты изофаз и изоамплитуд для каждой гармоники на акватории.

Для решения задачи воспользуемся методами теории функции комплексного переменного. Для этого представим каждую внутреннюю точку акватории и ее контура значением комплексного числа в виде  $z=x+iy$ , где  $x, y$  – вещественные плановые координаты точки акватории (ось  $x$  направлена на восток,  $y$  – на север).

Значение высоты прилива данной гармонической составляющей волны  $h(t)$  может быть записано в виде (рис. 2)

$$h(t) = A \cos(qt - g).$$

Здесь  $q$  – угловая скорость гармонической волны в один час среднего времени. Эти изменения можно представить в виде движения точки по окружности (фазовой) как показано на рис. 3. В этом случае имеют место следующие соотношения:  $h(t) = A \cos(\varphi(t))$ ,  $s(t) = A \sin(\varphi(t))$ , где  $\varphi(t) = qt - g$  – текущий фазовый угол. Отсюда высоту прилива данной гармонической составляющей волны в фиксированный момент времени  $t$  можно представить в виде комплексного числа  $w = h + is$ . Величины  $h$  и  $s$  в некоторый момент времени являются функциями от точки  $z$  акватории, а значит и значения  $w$  являются некоторой функцией от  $z$ :

$$w = f(z). \tag{1}$$

В выражении (1) в обеих частях равенства стоят комплексные переменные, следовательно (1) является функцией комплексного переменного.

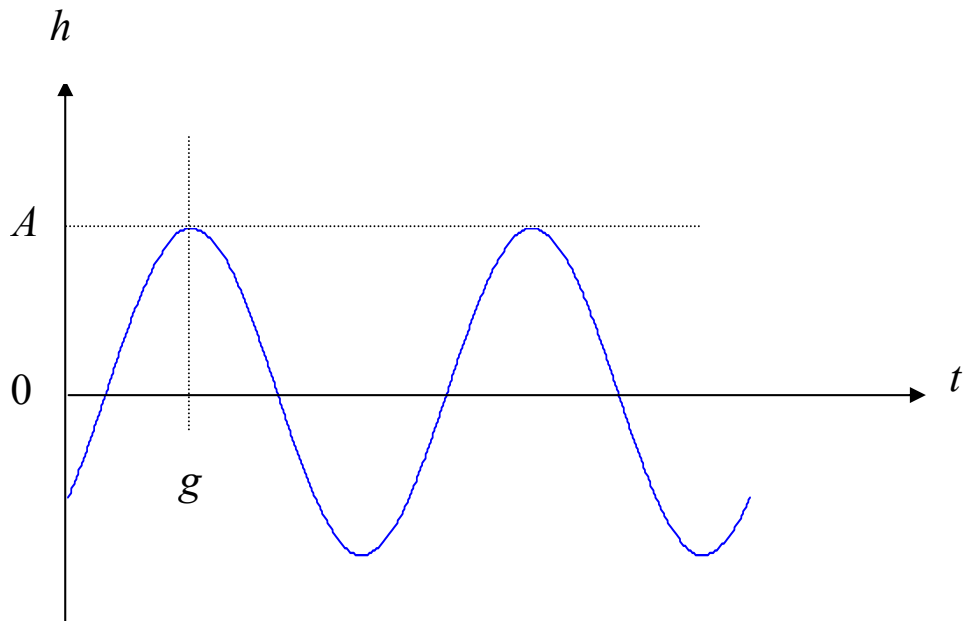


Рис. 2. Значения некоторой гармонической составляющей как функции от времени

Рассмотрим вытекающие из теории приливов свойства этой функции. В этой теории полагается, что изменения высоты прилива данной гармонической составляющей волны  $h(t)$

по пространству и времени непрерывно и гладко (т.е. дифференцируемо). Это позволяет предположить, что для функции (1) существует предел

$$\lim_{u \rightarrow 0} \frac{f(z+u) - f(z)}{u} \quad (2)$$

для всех точек акватории и ее контура, т.е. функция (1) дифференцируема. Это предположение позволяет воспользоваться свойствами аналитических функций [2]. Основным свойством аналитических функций, которое полезно для решения нашей задачи, является зависимость между значениями функции на контуре области и ее значениями внутри области (формула Коши)

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_C \frac{f(\zeta) d\zeta}{\zeta - z}, \quad (3)$$

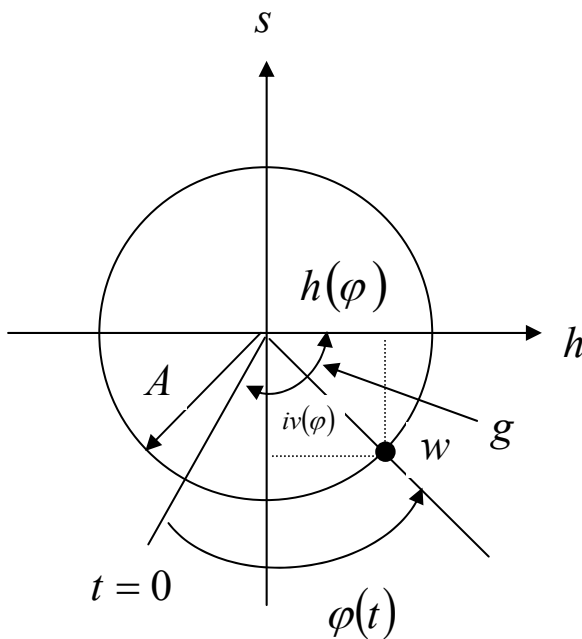


Рис. 3. Представление изменения значения гармонической составляющей на фазовой окружности

где  $C$  - граница акватории, проходимая так, что акватория остается все время слева,  $f(\zeta)$  - значение функции на границе акватории,  $\zeta$  - комплексная переменная, пробегающая все точки границы акватории.

Выражение (3) для вычислений непрактично. Более удобно воспользоваться тем обстоятельством, что для аналитической функции (1) действительная  $h=h(x,y)$  и мнимая  $s=s(x,y)$  части являются гармоническими функциями, то есть удовлетворяют уравнению Лапласа. Поэтому для  $h=h(x,y)$  имеем

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0. \quad (4)$$

Теперь задача сводится к решению (4) при заданных значениях высоты гармонической волны в некоторый момент времени на контуре акватории  $h(C)$  (задача Дирихле). При этом находятся неизвестные значения  $h=h(x,y)$  на акватории. Численное решение задачи Дирихле проводится методом сеток [2]. Если провести расчеты для последовательного набора дискретных значений времени, то полученные значения  $h(x,y,t)$  позволяют найти в узлах сетки амплитуды колебаний гармонической составляющей и определить время наступления максимального уровня, что является необходимой информацией для построения приливных карт для акватории.

Если на акватории есть острова (условие многосвязной области), то все вышеизложенное остается справедливым, только для решения задачи необходимо дополнительно задать значения  $h$  на контурах островов.

Отметим, что гармоническая функция, отличная от постоянной, не может достигать экстремума во внутренней точке акватории. Из теории приливов известно, что амплитуда приливов в открытом море меньше амплитуд приливов у берега. Это косвенно подтверждает используемое предположение об аналитичности функции (1). Прямое подтверждение может быть получено путем использования данных измерений уровня мареографами открытого моря или спутниковой альтиметрической информации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тимонов В. В. О кинематическом анализе приливов. // Труды ГОИН, 1959. - Вып. 37. - С. 185 – 204.
2. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. - М-Л.: ГИТТЛ, 1951. - 606 с.

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРИЛИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ В МОРЯХ****И. Л. БАШМАЧНИКОВ**

(СПб ГУ),

**Н. Е. ИВАНОВ,****В. А. РОЖКОВ**

(СПО ГОИН)

*В Федеральной целевой программе «Создание единой системы информации об обстановке в Мировом океане» («ЕСИМО») в 1999-2007 гг. для обеспечения морской деятельности предусмотрено выполнение проектов, включающих разработку информационного фонда данных по приливам Мирового океана, региональных пособий по приливам и приливному течению и программно-технологического обеспечения обработки информации. Поскольку в настоящее время для расчета характеристик приливов используются несколько методов (различные модификации гармонического анализа, спектральные методы и метод, основанный на теории полипериодически коррелированных случайных процессов), в настоящей статье выполнено их сопоставление. Приведены примеры оценивания характеристик приливных движений по данным натурных измерений колебаний уровня моря и скоростей течений, в том числе обусловленных внутренними волнами приливного происхождения.*

Приливные колебания уровня моря, скорости течений и термохалинных характеристик водных масс (в том числе обусловленные внутренними волнами приливного происхождения) вносят весьма существенный вклад в общий спектр движений Мирового океана. В Федеральной целевой программе «Создание единой системы информации об обстановке в Мировом океане» («ЕСИМО») в 1999-2007 гг. для обеспечения морской деятельности предусмотрена разработка информационного фонда данных по приливам Мирового океана, региональных пособий по приливам и приливному течению и программно-технологического обеспечения обработки и оперативного доступа к специализированной гидрологической информации.

Характерным свойством приливных движений является их регулярная повторяемость, обусловленная гравитационным взаимодействием Земли, Луны и Солнца. В первом приближении потенциал приливообразующей силы раскладывается на полусуточную, суточную и долгопериодную составляющие. Для фиксированной точки на Земном шаре изменчивость во времени каждой из них представляет собой гармоническое колебание, модулированное по амплитуде из-за квазипериодического изменения во времени склонений Луны и Солнца (с периодами 27.32 суток и 365.2422 суток соответственно), а также расстояний Земля-Луна и Земля-Солнце (с периодами 27.55 суток и 365.2596 суток соответственно). Величина максимального склонения Луны также меняется периодически (период 18.6 лет). Более точные астрономические формулы учитывают еще и  $1/3$ -суточный и  $1/4$ -суточный приливы, обусловленные возмущением орбит Земли и Луны другими небесными телами, непостоянством скорости орбитального движения Земли и Луны, скорости вращения системы Земля-Луна, скорости вращения Земли вокруг своей оси и положения оси Земли в пространстве [1, 2].

Гармонический анализ [3, 4, 5] основан на формальной замене гравитационного воздействия на воды океана Луны и Солнца воздействием фиктивных светил, вращающихся вокруг Земли в плоскости экватора по правильным круговым орбитам с постоянной скоростью. Приливные движения описывают суммой гармоник с неизвестными амплитудами и фазами, но с известными периодами, которые представляют собой линейную комбинацию шести фундаментальных астрономических периодов. Это - лунный день (период обращения Земли вокруг оси в Лунном времени), лунный месяц (период обращения Луны вокруг Земли), солнечный год (период обращения земли вокруг Солнца), 8.8 лет (период обращения перигея Луны), 18.6 лет (период обращения узлов орбиты Луны), 20900 лет (период обращения перигея орбиты Земли). Полусуточные, суточные и долгопериодные колебания представлены группами гармоник с близкими периодами. Впервые эта идея была высказана Лапласом в конце 18 в., потом развита Кельвином и доведена до вычислительной схемы Дарвином в 1867 г. Дарвин выделил 39 гармоник, Дудсон (1923 г.) - 400 гармоник, Картрайт (1971 г.) – 500 гармоник, Кивен и Тианханг (1987 г.) - более 1000 гармоник.

Однако приливы Мирового океана в общем случае не подчиняются статической теории. Приливообразующие силы генерируют вынужденную приливную волну, распространяющуюся при действии сил инерции, трения и т.д. Из общей теории колебаний следует, что период такой волны должен быть равен периоду возбуждающей силы, а амплитуда и фаза зависят от многих факторов и, в первую очередь, от передаточной функции системы, т.е. от параметров собственных колебаний бассейна. Как показано в работе [6], спектр собственных колебаний Мирового океана имеет “четко выраженный дискретный характер”, и периоды энергетически значимых собственных колебаний в суточном и полусуточном диапазонах лежат вблизи периодов основных гармоник приливного потенциала. Амплитуды и фазы реального прилива определяются в основном морфометрией бассейна.

Волновой характер прилива приводит к возникновению, помимо астрономических гармоник приливного потенциала, целого ряда новых периодических составляющих - так называемых нелинейных (или мелководных) гармоник. Математически они являются следствием нелинейности уравнений Навье-Стокса (нелинейность конвективных ускорений и ускорений, связанных с действием силы трения, а также нелинейность, обусловленная сопоставимостью на мелководье глубины моря и возвышений уровня), что особенно значимо на шельфе [7]. Результаты исследования [6], показали, что в колебаниях уровня для второстепенных гармоник вклад мелководных волн- «двойников» может составлять до 50, и даже до 90% амплитуды астрономической волны, а иногда и значительно превосходить их по амплитуде. В то же время для главных приливных волн этот вклад, как правило, не превосходит 10% амплитуды волны.

В гармоническом анализе предвычисление высоты уровня моря или проекций скорости течения на момент времени  $t$  выполняется по формуле

$$m(t) = m_0 + \sum_k |a_k| \cos(q_k t + \phi_k), \quad (1)$$



где  $q_k = 360^\circ/T_k$  – угловая скорость k-ой гармонической составляющей, гармоническая постоянная амплитуды  $|a_k| = f_k |h_k|$ , гармоническая постоянная фазы  $\phi_k = \phi_k + \theta_k$ . Периоды  $T_k$  задают на основе разложения потенциала приливообразующей силы в ряд Фурье, амплитуду  $|h_k|$  и фазу  $\phi_k$  определяют по результатам измерений, а редуциционный множитель  $f_k$  и астрономическую фазу  $\theta_k$  – по специальным таблицам для известной календарной даты. Реализации, используемые для оценивания  $|h_k|$  и  $\phi_k$ , имеют ограниченную, часто небольшую (15 – 30 суток), продолжительность. Поэтому в правой части (1) обычно учитывают до 28 волн, а в практических расчетах оценивают параметры, как правило, 8 основных суточных и полусуточных и дополнительно нескольких мелководных приливных гармоник (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика основных приливных волн

Суточные волны			Полусуточные волны			Мелководные волны		
Волна	$q_k$	$T_k$	Волна	$q_k$	$T_k$	Волна	$q_k$	$T_k$
	гр/час	час		гр/час	час		гр/час	час
$K_1$	15.041	23.934	$M_2$	28.984	12.420	$MS_4$	58.984	06.103
$P_1$	14.959	24.066	$S_2$	30.000	12.000	$M_4$	57.968	6.210
$O_1$	13.943	25.819	$N_2$	28.440	12.658	$S_4$	60.000	6.000
$Q_1$	13.399	26.868	$K_2$	30.082	11.967	$M_6$	89.952	4.14

Примечание.  $T_k$  - период волны,  $q_k = 360^\circ/T_k$  - угловая скорость волны.

Поскольку в основе классического гармонического анализа приливов лежит модель детерминированного процесса, ошибки предвычисления объясняют неполнотой учета приливных гармоник, а достоверность оценок амплитуд и фаз не обсуждается.

Оценивание гармонических постоянных по данным наблюдений состоит в вычислении амплитуд и фаз гармоник приливных периодов таким образом, чтобы сумма этих гармоник  $m(t)$  наилучшим образом аппроксимировала результаты наблюдений  $\zeta(t)$  на любой заданный момент времени  $t$ . Теоретически оценки можно получить даже по очень небольшому отрезку реализации, это, однако, практически нереализуемо из-за постоянно присутствующего в природных рядах случайного шума – по образному выражению авторов статьи [8]: «Процессы, происходящие при отсутствии шума, не встречаются нигде, за исключением литературы по приливному явлениям».

В гармоническом анализе для расчетов по сериям данных измерений  $\zeta(t)$  используется метод наименьших квадратов (МНК) [9]

$$\zeta(t) = m(t) + \varepsilon, \quad (2)$$

где математическое ожидание  $m(t)$  имеет вид (1), а  $\varepsilon$  - белый шум. Подчеркнем, что метод МНК учитывает шумовую компоненту  $\varepsilon$  (2) через дисперсию оценок параметров приливных гармоник, вычисляемых по регрессионной модели [10].

Количество гармоник, параметры которых можно надежно оценить по серии дискретных наблюдений заданной продолжительности, лимитировано. Существует ряд полуэмпирических критериев минимальной длины реализации  $\theta$ , необходимой для разделения гармоник с частотами  $\omega_i, \omega_j$ . Одним из наиболее строгих является критерий [11]: «Для надежного разделения двух гармоник необходимо, чтобы за время  $\theta$  гармоники разошлись по фазе не менее, чем на период», т.е.

$$\theta \geq \frac{360^\circ}{\omega_i - \omega_j} \sqrt{\frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sigma_\zeta^2 - \sigma_\varepsilon^2}}, \quad (3)$$

где  $\sigma^2$  - дисперсия исходной реализации  $\zeta(t)$ ,  $\sigma_\varepsilon^2$  - дисперсия случайного шума  $\varepsilon$ .

При  $\sqrt{(\bullet)}=1$  выражение (3) обращается в критерий Релея. По менее строгому критерию Година [12] достаточно, чтобы гармоники разошлись на  $290^\circ$ . Поэтому отделить суточную составляющую от полусуточной можно уже из суточного ряда наблюдений: для разделения гармоник  $M_2-S_2$ ,  $K_1-O_1$  требуется не менее 15 суток,  $M_2-N_2$  - не менее 30 суток,  $K_1-P_1$  - не менее года.

В зависимости от длины ряда наблюдений применяют различные методы гармонического анализа: ААНИИ и Адмиралтейский методы для анализа суточной серии наблюдений; методы МНК и Дудсона, если длина серии наблюдений составляет более нескольких суток (стандартно — 1 месяц) [1, 10, 13, 14, 15]. В случае когда длина серии наблюдений не позволяет разделить гармоники  $\mathfrak{T}_p$  и  $\mathfrak{T}_q$ , используют искусственные приемы. Так, при введении поправок Зетлера по натурным данным оценивают амплитуду  $|h_{pq}|$  и фазу  $\varphi_{pq}$  суммарного колебания и постулируют равенство фаз  $\varphi_p = \varphi_q$ , а соотношение амплитуд  $|h_p|/|h_q|$  полагают равным теоретическому соотношению соответствующих гармоник приливного потенциала. В [14] показано, что для приливных колебаний уровня обусловленные этим погрешности могут достигать 25% по амплитуде и  $20^\circ$  по фазе. При наличии длительных (1 год и более) серий наблюдений МНК позволяет оценивать параметры приливных гармоник различных классов – от короткопериодных (1/6 - 1/3 суточных) мелководных до долгопериодных [10, 16].

Приливные движения в Мировом океане (колебания уровня моря, скоростей течений, температуры воды и других гидрологических характеристик под влиянием внутренних волн приливного происхождения) протекают на фоне и во взаимодействии с разномасштабными гидрофизическими процессами. К последним относятся сгоны и нагоны, анемобарические волны, сейши, инерционные и синоптические флюктуации скорости течений, годовой ход речного стока, бароклинные возмущения внутренних волн и т. д. Поэтому приливные составляющие, выделяемые методом гармонического анализа, содержат не только регулярный компонент, но и стохастическую добавку.

По мере применения гармонического анализа не только к приливному колебаниям уровня, которые хорошо выражены и слабо зашумлены, но и к внутренним волнам приливного происхождения, наиболее подверженным

стохастизирующему воздействию элементов топографии дна и изменчивости стратификации и течений, стало очевидным, что гармонические постоянные таковыми не являются [13, 17, 18]. Поэтому спектральный анализ стационарных случайных процессов является более общим и соответствует природе анализируемых явлений. Стационарный процесс  $\zeta(t)$  может быть представлен [19] в виде:

$$\zeta(t) = \int_{\langle \omega \rangle} \exp(i\omega t) \Phi(d\omega), \quad (4)$$

где  $\Phi(\cdot)$  – спектральная стохастическая мера, связанная со спектральной функцией

$$F(d\omega) = M|\Phi(d\omega)|^2, \quad (5)$$

где  $M\{\bullet\}$  – оператор математического ожидания.

Для этой функции справедливо разложение

$$F(\omega) = F_1(\omega) + F_2(\omega) + F_3(\omega), \quad (6)$$

где  $F_1(\omega)$  абсолютно непрерывна относительно меры Лебега,  $F_2(\omega)$  может меняться только скачками в конечном или счетном множестве точек  $\omega$ ,  $F_3(\omega)$  непрерывна и имеет почти всюду по мере Лебега равную нулю производную. Следовательно,  $\Phi(d\omega)$  в (4) являются случайными величинами и об амплитудах стохастических колебаний  $\zeta(t)$  можно говорить лишь в среднем квадратичном.

Из (6) следует, что процесс  $\zeta(t)$  может быть разложен [19] в сумму

$$\zeta(t) = \zeta_r(t) + \zeta_s(t) \quad (7)$$

некоррелированных стационарных процессов – регулярного  $\zeta_r(t)$  и сингулярного  $\zeta_s(t)$ , каждый из которых может быть получен из  $\zeta(t)$  физически осуществимым линейным преобразованием. По существу, на (7) можно смотреть как на расширение регрессионной модели (2), когда под  $\varepsilon(t)$  понимается стационарный процесс с непрерывным спектром, а под  $m(t)$  – результат линейной фильтрации

$$m(t) = \int g(\tau) \zeta(t + \tau) d\tau, \quad (8)$$

где  $g(\tau)$  – весовая функция.

Метод “отклика”, разработанный в [8], заключается в представлении прилива в данный момент времени  $\zeta(t)$  в виде суммы взвешенных значений приливного потенциала  $P(\varphi, \lambda, t)$  с весами  $w(t)$ :

$$\zeta(t_j) = \sum_j w(t_j) * P(\varphi, \lambda, t_j). \quad (9)$$

При этом в приливном потенциале разделяется влияние пространственной и временной изменчивости приливообразующей силы:

$$P(\varphi, \lambda, t) = \sum_n \sum_m C_m^n(t_j) * Y_m^n(\varphi, \lambda), \quad (10)$$

где  $n$  - номер члена разложения приливного потенциала по степеням  $r/d$ ,  $m=-n, \dots, n$  характеризует класс прилива в связи с выражением  $C_m^n(t) = C'(d, \delta, s) * e^{-imt}$  (здесь  $C'$  - некоторая функция от астрономических параметров Луны или Солнца: расстояния до светила ( $d$ ), склонения светила ( $\delta$ ), средней долготы ( $s$ )). Влияние пространственной изменчивости прилива выражается в виде домножения каждого члена  $C_m^n$  на сферические гармоники  $Y_m^n(\varphi, \lambda) = L_{nm}(\varphi) * e^{im\lambda}$ , где  $L$ -полином Лежандра, представляющий собой квази-гармоническую функцию широты. При  $n=2$ , соответствующие значения  $L_{20}$ ,  $L_{21}$ ,  $L_{21}$  представляют собой долгопериодный (1-рода), суточный (2-рода) и полусуточный (3-го рода) приливы Лапласа [6]. Здесь не используют какие-либо гипотезы относительно временной изменчивости приливного потенциала в виде разложения его на сумму гармоник и возможности пренебрегать частью этих гармоник, введения нодальной модуляции и т.д., поскольку временная изменчивость приливного потенциала задается непосредственно в виде функции от астрономических параметров Луны и Солнца. Основной задачей является определение по известным данным наблюдений и величине приливного потенциала весовых функций  $w(t)$ . Они называются функциями отклика, поскольку зависят от характера реакции океана на воздействие гравитационных сил Луны и Солнца, и ее величина связана, прежде всего, с резонансными особенностями того или иного океанического бассейна. Обобщение данного метода в виде теоретического решения уравнения приливных движений Лапласа с помощью функций Грина можно найти в работе [20].

Часто функцию отклика ищут не во временной, а в частотной области, выполняя преобразование Фурье уравнения (9)

$$H(\omega) = Z(\omega)V(\omega), \quad (11)$$

$$\text{где } H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad V(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad Z(\omega) = \int_0^{\infty} w(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau.$$

В этом случае функция  $Z(\omega)$  представляет собой просто передаточную функцию (иногда ее тоже называют функцией адмиттенса) от приливообразующей силы приливным движениям в океане. Резонанс морского бассейна будет зависеть от близости периодов свободных колебаний бассейна к периоду возбуждающей силы и, следовательно, будет плавно меняться с частотой волны, что было подтверждено анализом натуральных данных [1, 16]. Поэтому при недостаточной длине реализации оценивать передаточную функцию возможно лишь для основных приливных гармоник, находя характеристики второстепенных гармоник простой интерполяцией. Кроме того, можно «очистить» амплитуды части астрономических составляющих от вклада мелководных «двойников» за счет выбора для определения функции адмиттенса только тех составляющих, где влияние мелководных «двойников» сравнительно мало (обычно ими являются наиболее энергетические гармоники). Данный метод был успешно применен в работе [16]. В то же время амплитуды и фазы мелководных гармоник, связанные с искажением профиля волны на мелководье за счет эффекта конечности глубины, значительного донного трения и нелинейного взаимодействия приливных гармоник, можно найти из численного решения системы уравнений гидродинамики, задавая астрономи-

ческий прилив на жидкой границе (кромка шельфа) и условия отражения волны у берега [21].

Фильтрационный метод предложен в [21] в виде модификации гармонического анализа, в которой оцениванию амплитуд и фаз приливных гармоник предшествует выделение из данных измерений приливной составляющей и разделение ее на классы приливов (суточный, полусуточный и т.д.) методами спектрального анализа в стационарном приближении с использованием специальных фильтров (9).

Метод отклика позволяет дать обобщение для нелинейных взаимодействий в виде:

$$\zeta(t_j) = \sum_j w(t_j) P(\varphi, \lambda, t_j) + \sum_j P(\varphi, \lambda, t_j) \{ \sum_i w(t_i) P(\varphi, \lambda, t_i) \}. \quad (12)$$

Однако для более точного учета нелинейных эффектов необходимо учитывать их физическую природу. Это наиболее актуально при анализе внутренних волн приливного происхождения, т.к. анализ многочисленных данных измерений [23] показывает, что у них в отличие от баротропных приливных колебаний стохастический компонент вносит весьма существенный вклад в приливную ритмику, иногда даже превосходя по интенсивности регулярный компонент. Внутренние (бароклинные) приливные волны проявляются прежде всего в колебаниях скорости течений и вертикальных смещениях изотерм и изогалин. Значительная стохастизация амплитуд и фаз приливных колебаний обусловлена тем, что они формируются баротропными приливными волнам, а не непосредственно приливообразующей силой. Их характеристики зависят не только от параметров порождающего их баротропного прилива, но и от стратификации в районе генерации и на пути распространения, наличия крупномасштабных неоднородностей рельефа дна, фоновых полей плотности и скорости течения, причем флюктуируют не только сами амплитуды и фазы, но и их вертикальные профили. Стохастичность внутренних волн особенно велика в динамичных районах фронтальных зон [24]. Спектр приливных колебаний внутренних волн часто довольно сильно размыт в отличие от линейчатых спектров колебаний уровня моря и баротропных приливных течений. Из-за сильной стохастизации внутренних приливных волн и множественности ее источников применение стандартного гармонического анализа для обработки полумесячных серий наблюдений не дало положительных результатов [17, 23, 25]. Для исследования внутренних приливных волн были предложены методы Цейлона (метод многократной автокорреляции для выделения преобладающего периода) и Фуриха (корреляционный метод вычисления коэффициентов корреляции между значениями серии наблюдений). Однако наибольшее распространение получил метод спектрального анализа в стационарном приближении [23, 26, 27], несмотря на более низкую точность гармонических постоянных, получаемую этим методом, которую связывают с отличиями частот приливных гармоник от частот, получаемых преобразованием Фурье реализации конечной длины, как указано в работе [16].

Для анализа натуральных данных, содержащих как детерминированные, так и стохастические компоненты, наиболее приемлема модель полипериодически коррелированного случайного процесса (ППКСР) [28], которая имеет вид

$$\zeta(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \zeta_k(t) \exp(i\omega_k t), \quad (13)$$

где  $\zeta_k(t)$  – стационарные компоненты с математическим ожиданием  $m_k$  и ковариационной функцией  $K_k(\tau)$ .

Математическое ожидание

$$m_{\zeta}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} m_k \exp(i\omega_k t), \quad (14)$$

корреляционная функция

$$K_{\zeta}(t, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} K_k \exp(i\omega_k t), \quad (15)$$

и дисперсия  $D_{\zeta}(t) \equiv K_{\zeta}(t, \tau=0)$  процесса  $\zeta(t)$  являются почти периодическими функциями. Частоты  $\omega_k=2\pi/T_k$  у приливных процессов образуют дискретное множество, задаваемое исходя из теории гармонического анализа приливов.

Поскольку периоды основных приливных гармоник не кратны интервалу дискретизации ряда исходных наблюдений, для их оценивания используется компонентный метод

$$m_k = 1/\theta \int_0^{\theta} \zeta(t) \exp(-i\omega_k t) dt, \quad (16)$$

$$K_k(\tau) = 1/\theta \int_0^{\theta} \zeta^{\circ}(t) \zeta^{\circ}(t + \tau) \exp(-i\omega_k t) dt, \quad (17)$$

где  $\zeta^{\circ}(t) = \zeta(t) - m(t)$ ,  $\theta$  - длина реализации  $\zeta(t)$ .

Из (16) – (17) следует, что с точки зрения оценивания математического ожидания модель ППКСП и гармонический анализ тождественны, а оценки компонентов дисперсии и корреляционной функции позволяют получить дополнительную информацию о стохастическом компоненте приливной ритмики. Модель (13) – (17) позволяет проводить расчеты и по данным неэкви-дистантных измерений, что в частности позволяет анализировать данные с пропусками.

Соотношение регулярного и стохастического компонентов можно оценить коэффициентом вариации

$$r_k = \sigma_k / m_k, \quad \sigma_k = D_k^{0.5}. \quad (18)$$

В зависимости от сложности прилива и продолжительности ряда наблюдений оценивают различное количество гармоник. Степень сложности спектра приливных колебаний и вклад составляющих зависят преимущественно от региональных особенностей, а иногда и от сезона. Специфика модели ППКСП состоит в том, что необходимый для надежной аппроксимации реального прилива набор компонентов должен быть определен априорно. Для этого можно использовать аппарат спектрального анализа в стационарном приближении.

Приливные колебания скорости морских течений, в том числе обусловленные внутренними волнами приливного происхождения, можно представить как векторный ППКСП

$$\vec{V}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \vec{V}_k(t) \exp(i\omega_k t), \quad (19)$$

у которого математическое ожидание  $\vec{m}_{\vec{v}}(t)$  – почти периодический вектор, а  $\mathbf{D}_{\vec{v}}(t)$  – почти периодическая тензорная функция [29].

В компонентной форме  $\vec{m}_{\vec{v}}(t)$  можно представить в виде:

$$\vec{m}_{\vec{v}}(t) = \vec{m}_0 + \sum_{k=1}^s \vec{m}_k(t). \quad (20)$$

Конец периодического вектора  $\vec{m}_k(t)$  обходит (по часовой стрелке или против часовой стрелки) эллипс с полуосями  $L_1^{(k)}$ ,  $L_2^{(k)}$ , фазой  $\varphi_k \pm 180^\circ$ , развернутый на угол  $\beta_k \pm 180^\circ$  относительно направления на север. Параметры этих эллипсов определяют [29] через амплитуды и фазы компонентов проекций  $\vec{m}_{\vec{v}}(t)$  на оси декартовой системы координат. Впервые подобный подход был использован для вычисления максимальных скоростей приливных течений [30].

Тензорную кривую  $\mathbf{D}_{\vec{v}}(t)$  можно представить отрезком ряда Фурье

$$\mathbf{D}_{\vec{v}}(t) = \sum_k [\mathbf{D}_k^{(c)} \cos(\omega_k t) + \mathbf{D}_k^{(s)} \sin(\omega_k t)] = \sum_k [|\mathbf{D}_k| \cos(\omega_k t + \psi_k)], \quad (21)$$

где тензоры  $\mathbf{D}_k^{(c)}$  и  $\mathbf{D}_k^{(s)}$  – коэффициенты косинусных и синусных компонентов Фурье разложения почти периодического тензора дисперсии  $\mathbf{D}_{\vec{v}}(t)$ . Если векторную гармонику можно представить эллипсом, то тензорную гармонику описывает кривая более высокого порядка, для геометрической интерпретации которой требуется упрощение характеристик, например, через

$$|\mathbf{D}_k| = \{[\mathbf{D}_k^{(c)}]^2 + [\mathbf{D}_k^{(s)}]^2\}^{0.5} \quad (22)$$

$$\psi_k = \arctg(\mathbf{D}_k^{(c)}/\mathbf{D}_k^{(s)})$$

В момент времени  $t$  тензорная гармоника  $\mathbf{D}_{\vec{v}}^{(k)}(t)$  – эллипс с полуосями  $\lambda_{1,2}^{(k)}(t)$ , большая ось  $\lambda_1^{(k)}(t)$  которого ориентирована относительно направления на север на угол  $\alpha^{(k)}(t)$ . Величины  $\lambda_{1,2}^{(k)}$  характеризуют распределение по ортогональным направлениям дисперсии  $\mathbf{D}_{\vec{v}}^{(k)}(t)$  векторной гармоники  $\vec{V}_k(t)$ .

Проиллюстрируем изложенное выше на примере анализа данных измерений уровня моря и скорости течений в различных приливных морях. Характеристики временных рядов продолжительностью от 12 суток до 1 года приведены в табл. 2. На рис. 1 приведены графики отрезков исходных реализаций (кривая 1) колебаний уровня моря  $H(t)$ , модуля  $V(t)$  и направления  $\alpha(t)$  скорости течения.

Таблица 2

## Характеристика временных рядов данных измерений

№ ряда	Море (залив), горизонт, м	Начало – конец	Дискретность	Продолжительность, час.
Наблюдения за уровнем моря, см				
1	Белое море	01.07 – 31.07.68	1 час	744
2	Карское море	01.01 - 31.12.75	1 час	8760
3	Охотское море	01.01 – 31.12.48	1 час	8784
Наблюдения за скоростью течения, см/с				
4	Тазовская губа, 3 м (суммарное течение)	06.09 – 19.09.99	10 мин	310
5	Тазовская губа, 5 м (суммарное течение)	06.09 – 19.09.99	10 мин	310
6	Гренландское море, 1120 м (бароклинная составляющая*)	26.06.88 – 9.04.89	1 час	7100
7	Гренландское море, 1600 м (бароклинная составляющая*)	26.06.88 – 19.04.89	1 час	7100

На рис. 2 представлены графики оценок спектральной плотности  $S(\omega)$  в стационарном приближении (кривая 1) колебаний уровня Охотского (ряд 3 из табл. 2) и Карского (ряд 2 из табл. 2) морей. Из них следует, что в обоих случаях основной вклад в суммарную дисперсию вносят низкочастотные колебания (проявляющиеся в виде красного шума) и приливы смешанные и полусуточные (проявляющиеся в виде узкополосных сигналов). На рис. 2 на врезках показаны фрагменты графиков оценок  $S(\omega)$  для диапазонов суточного и полусуточного приливов, вычисленные с более высоким разрешением по частоте  $\omega$ . Основной вклад в суточные приливные колебания вносят волны  $O_1$  и  $K_1$ ,  $P_1$ , а в полусуточные –  $M_2$  и  $S_2$ ,  $K_2$ .

В табл. 3 приведены оценки амплитуд  $|m_k|$  и фаз  $|\varphi_k|$  компонентов  $m_k$  математического ожидания приливных колебаний уровня моря и проекций скорости течения, вычисленные методами МНК (верхняя строка ячейки) и ППКСП (нижняя строка ячейки). Из табл. 3 видно, что для разных волн отличия в оценках не одинаковы. Погрешности оценивания гармонических постоянных обусловлены различными факторами и прежде всего - неполным разделением близких по частоте гармоник по дискретным реализациям ограниченной продолжительности. Наиболее сильно это сказывается в на оценках параметров волн  $K_1$ ,  $P_1$  и  $S_2$ ,  $K_2$  (табл. 3).

Кроме того, эти оценки содержат статистическую погрешность. Метод МНК учитывает шумовую компоненту в виде случайной величины  $\varepsilon$  в (2) через дисперсию оценок параметров приливных гармоник, вычисляемых по регрессионной модели. В работах [12, 31] среднеквадратическая ошибка  $\sigma_{m_k}$  оценок амплитуды приливов определена через дисперсию остаточного ряда,

\* Бароклинная составляющая выделялась как остаточная изменчивость скорости течения на приливных частотах, полученная после удаления баротропной составляющей прилива по данным анализа вертикального хода характеристик приливного течения (на 4-х горизонтах), с привлечением результатов гидродинамического моделирования



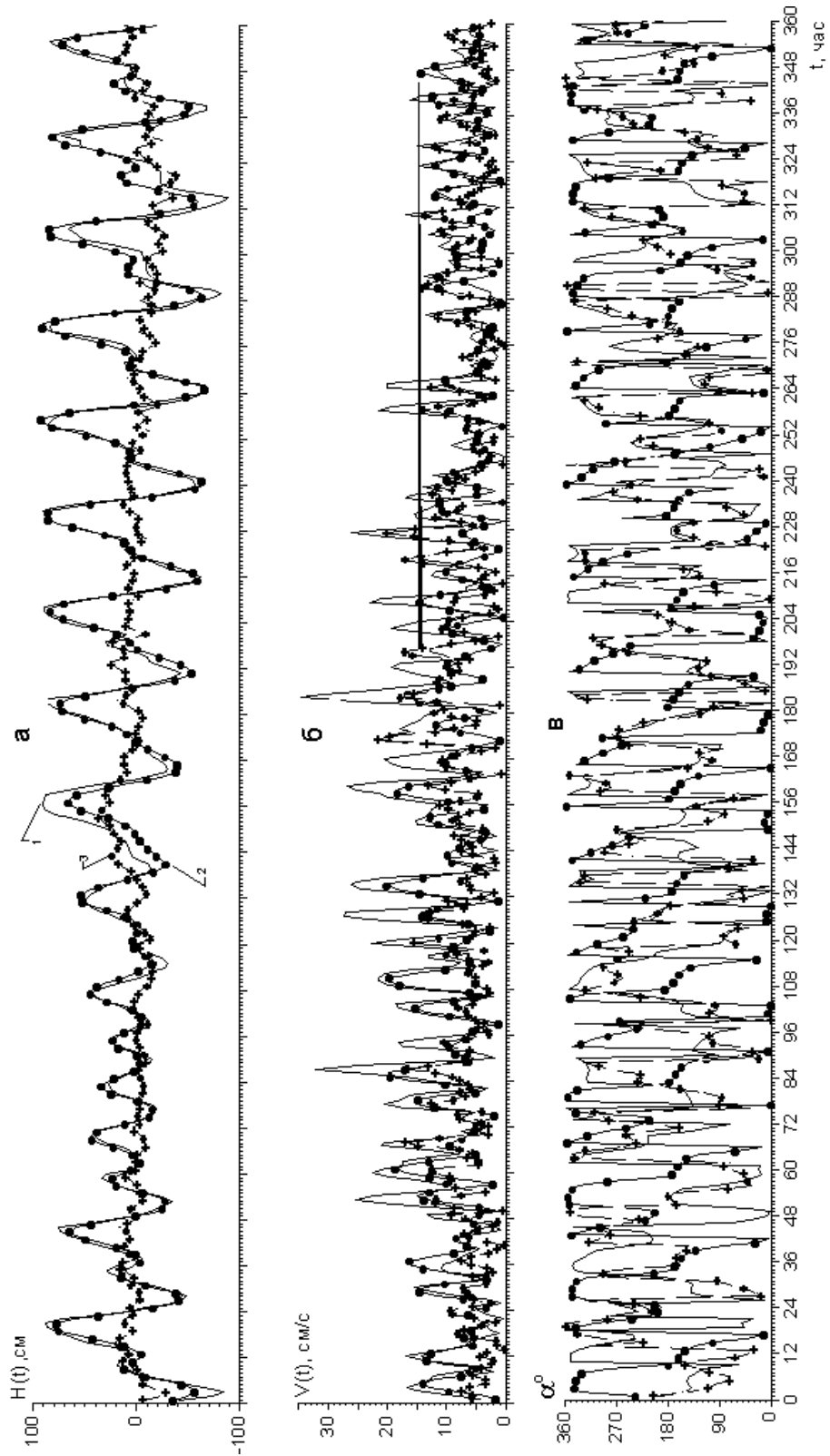


Рис. 1. Временные ряды уровня в Охотском море (а), модуля (б) и направления (в) бароклинной составляющей скорости течения в Гренландском море на горизонте 1600 м. 1 – измеренные значения, 2 – приливной компонент, 3 – неприливной компонент

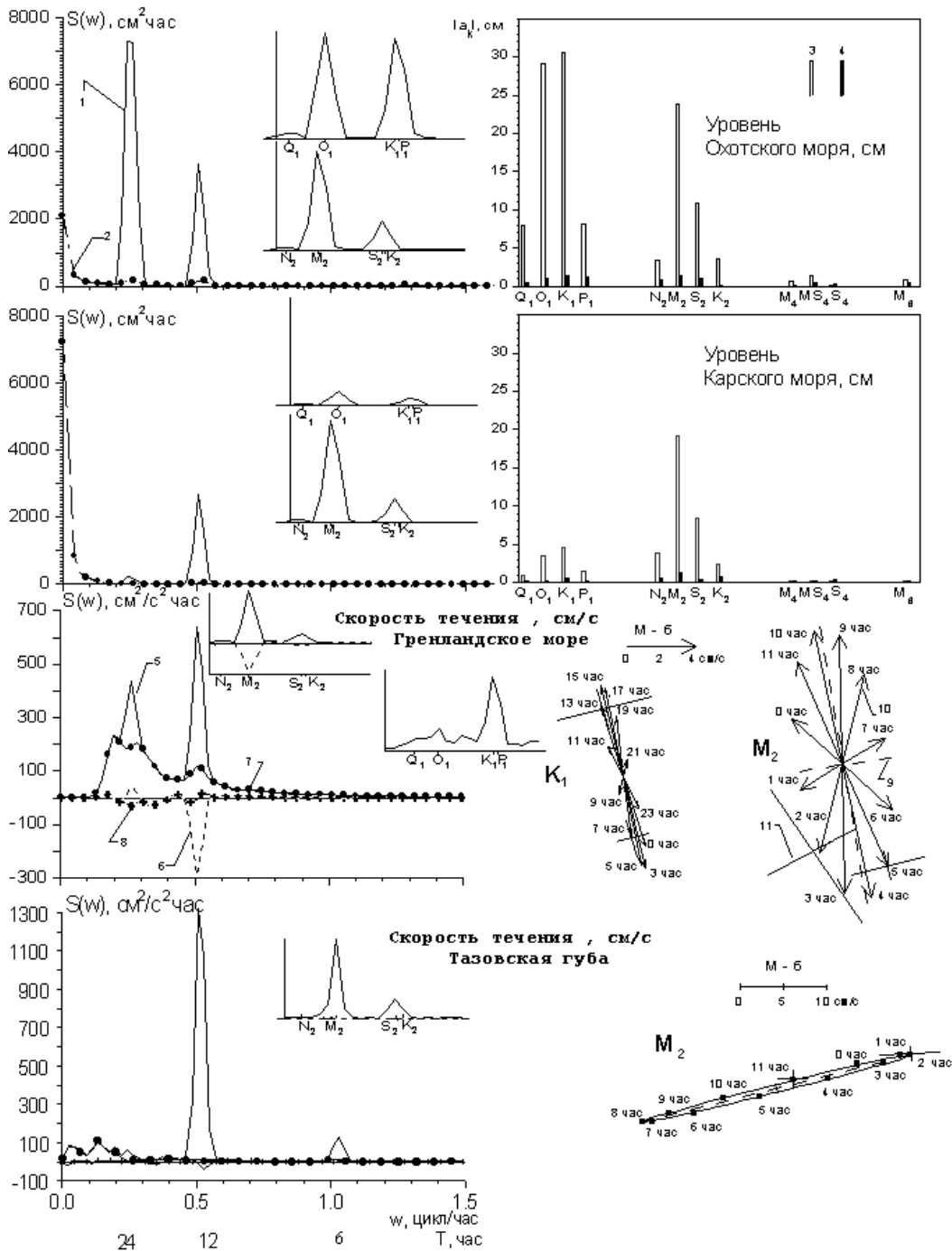


Рис. 2. Оценки вероятностных характеристик приливных колебаний уровня моря и скорости течения в стационарном и ПКСП – приближении. Уровень моря: спектральная плотность  $S(\omega)$  исходных данных (1) и неприливног остатка (2), амплитуды  $|a_k|$  компонентов математического ожидания (3) и СКО (4). Скорость течения: линейный инвариант (5, 7) и индикатор вращения (6, 8) тензоров спектральной плотности исходных данных и неприливног остатка соответственно, оси эллипсов (9) и годограф (10) компонентов вектора математического ожидания и оси эллипсов тензоров минимального и максимального СКО (11)

Таблица 3  
 Амплитуда  $|m_k|$  и фаза  $\phi_k$  компонентов математического ожидания  $m_k$  приливных колебаний уровня моря и проекций скорости течения для основных приливных волн, вычисленные по МНК-модификации гармонического анализа и методом поли-ПКСП

№ ряда	Суточные волны						Полусуточные волны						Мелководные волны											
	O <sub>1</sub>		K <sub>1</sub>		P <sub>1</sub>		Q <sub>1</sub>		M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>		K <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		MS <sub>4</sub>		M <sub>4</sub>		S <sub>4</sub>		M <sub>6</sub>	
	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$	$ m_k $	$\phi_k$
1	1.1	4	5.2	320	1.7	320	1.1	120	30.7	336	6.3	263	1.7	263	5.4	207	1.8	332	2.6	25	0.4	287	2.2	306
1.0	9	6.5	290	0.5	153	1.0	125	30.4	332	4.9	312	0.6	35	5.3	202	3.8	300	0.3	358	0.1	145	1.4	292	
2	3.4	307	4.2	132	1.4	132	0.9	341	19.2	38	8.4	137	2.3	137	3.8	193	0.1	73	<0.1	141	<0.1	35	0.1	353
3.2	296	4.5	108	0.8	148	1.0	327	18.8	40	7.1	99	0.2	2	3.8	205	0.1	78	<0.1	179	<0.1	42	<0.1	6	
29.2	288	30.5	203	10.1	203	8.2	292	23.9	214	10.9	166	3.6	166	3.3	206	1.3	92	0.7	88	0.1	118	0.9	36	
29.5	280	35.5	220	4.1	108	8.0	290	24.6	214	11.0	182	0.3	344	3.3	214	1.3	103	0.9	75	<0.1	129	0.5	359	
Уровень моря																								
Проекция скорости течения																								
4 a	1.0	247	0.3	332	0.1	332	0.7	44	6.8	269	4.1	95	1.1	95	0.7	328	0.2	25	1.4	196	0.7	209	0.4	44
1.0	247	0.5	335	0.1	176	0.5	40	7.3	274	4.4	146	0.1	176	0.5	335	0.3	33	1.6	195	0.7	207	0.1	207	
4.6	3.3	276	0.9	40	0.3	40	1.1	22	15.6	270	9.1	94	2.5	94	1.2	314	0.1	145	3.2	199	1.0	198	1.0	38
3.3	274	1.3	50	0.1	198	1.3	27	16.5	279	9.6	126	0.2	170	1.5	308	0.1	174	3.0	204	1.2	195	0.6	29	
5 a	1.0	280	0.5	354	0.2	354	0.5	334	3.6	268	2.3	107	0.6	108	0.6	334	0.3	187	1.5	192	0.6	215	0.6	106
1.0	285	0.7	2	0.1	358	0.4	340	3.7	264	1.9	141	0.1	191	0.4	341	0.1	195	1.6	188	0.6	212	0.1	180	
2.7	271	0.6	33	0.2	33	1.0	45	14.5	269	8.7	99	2.4	99	1.3	310	0.2	35	2.8	205	1.2	204	0.8	35	
2.7	268	0.9	42	0.2	191	1.2	38	15.3	262	8.3	119	0.3	137	1.1	313	0.4	32	2.8	207	1.1	202	0.5	43	
2.6	161	5.2	233	1.9	248	0.6	130	10.8	25	4.2	54	1.2	68	2.2	20	0.1	39	0.1	143	0.1	98	0.1	255	
3.0	158	5.5	241	1.8	242	0.5	133	10.4	27	4.3	63	1.6	61	2.2	27	0.1	90	0.1	360	<0.1	128	0.1	110	
0.8	346	2.4	30	1.1	16	0.6	237	3.6	260	0.8	330	0.5	305	1.1	212	0.2	180	0.1	33	<0.1	335	0.1	135	
0.9	351	2.6	38	1.1	12	0.5	235	3.2	254	0.9	319	0.9	318	0.6	118	0.1	95	0.1	35	<0.1	74	0.1	116	
2.2	153	4.5	218	1.4	224	0.5	120	8.9	357	3.3	19	1.0	27	1.3	336	0.2	234	0.2	157	0.2	212	0.1	255	
2.4	158	4.8	221	1.2	214	0.6	330	8.5	354	3.4	15	1.5	27	1.3	330	0.1	210	0.1	90	0.3	225	0.1	110	
0.6	351	3.0	18	0.4	20	0.7	215	3.0	243	1.0	340	0.4	281	0.7	330	0.2	192	0.2	89	0.1	44	0.1	135	
0.8	355	3.4	20	0.4	355	0.6	74	2.8	139	1.1	333	0.3	277	0.8	343	<0.1	170	0.1	95	0.1	107	0.1	116	

Примечания. В первой графе (№ ряда) номера те же, что и в табл. 2. Амплитуда  $|m_k|$  математического ожидания колебаний уровня моря дана в см, проекции (а – на меридиан, б – на параллель) скорости течений в см/с, фаза  $\phi_k$  – в градусах. В каждой ячейке оценки по методу МНК приведены в верхней строке, а оценки по методу ПКСП – в нижней строке.

Таблица 4  
 Амплитуда  $|\sigma_k|$  и фаза  $\psi_k$  компонентов СКО  $\sigma_k$  приливных колебаний уровня моря и проекций скорости течения для основных приливных волн, вычисленные по методике поли-ПКСП

№ ряда	Суточные волны						Полусуточные волны						Мелководные волны											
	$ \sigma_k $	$\psi_k$	$ \sigma_k $	$\psi_k$	$ \sigma_k $	$\psi_k$	$ \sigma_k $	$\psi_k$	$ \sigma_k $	$\psi_k$	$ \sigma_k $	$\psi_k$	$ \sigma_k $	$\psi_k$	$ \sigma_k $	$\psi_k$	$ \sigma_k $	$\psi_k$	$ \sigma_k $	$\psi_k$				
1	0.7	8	0.3	23	0.3	346	0.3	352	1.5	223	0.6	234	0.5	262	1.0	218	0.7	260	0.4	346	0.6	278	0.4	350
2	0.1	180	0.5	351	0.2	76	0.2	20	1.3	325	0.4	270	0.7	212	0.6	230	0.1	255	0.1	177	0.3	354	0.2	90
3	1.1	179	1.3	138	1.2	151	0.5	163	1.4	236	1.1	21	0.2	199	0.8	42	0.4	163	0.1	40	0.3	89	0.5	163
Уровень моря																								
Проекция скорости течения																								
4a	2.1	284	1.4	39	1.5	33	1.4	124	1.0	101	1.3	141	1.3	142	14	36	0.9	225	1.5	122	1.1	95	0.7	115
4б	5.7	159	5.2	59	4.5	12	4.4	179	3.0	162	0.8	127	1.6	132	1.9	152	2.2	129	3.5	47	0.8	217	1.2	326
5a	1.4	291	1.6	346	1.5	348	1.5	275	1.6	262	1.0	354	0.9	354	1.3	202	0.6	146	1.3	117	0.9	195	1.1	226
5б	4.9	266	4.7	267	4.1	263	3.9	195	2.8	142	2.4	151	2.6	155	1.7	163	1.7	163	3.4	40	0.8	345	0.5	245
6a	1.9	202	2.0	267	2.9	46	1.4	50	2.0	122	1.1	22	2.3	296	2.3	5	0.9	277	2.3	299	1.1	4	0.8	244
6б	1.2	79	1.3	188	0.8	349	1.1	129	2.4	190	1.1	280	3.3	252	2.9	170	2.2	77	2.0	323	1.5	155	0.6	207
7a	1.3	174	1.9	75	1.6	125	1.2	294	1.7	27	1.2	225	2.3	140	2.2	182	2.2	175	2.0	315	1.3	344	1.2	162
7б	3.1	63	1.9	223	3.6	196	2.9	245	1.5	351	3.2	348	2.5	124	1.9	138	1.7	121	1.5	146	1.0	48	0.8	320

Примечания. В первой графе (№ ряда) номера те же, что и в табл. 2. Амплитуда  $|\sigma_k|$  СКО колебаний уровня моря в см, проекции (а – на меридиан, б на параллель) скорости течений в см/с, фаза  $\psi_k$  в градусах.

полученного как разность исходных и предвычисленных по (1) значений (кривая 3 на рис. 1). Метод ППКСП учитывает шумовую компоненту через случайные процессы  $\zeta(t)$ , которые могут быть как аддитивными по отношению к приливному колебанию  $m(t)$ , так и взаимодействовать с ними. В работе [32] среднеквадратическая ошибка  $\sigma_{m_k}$  определена с учетом корреляционной структуры остаточного ряда. В стационарном приближении к ППКСП корреляционная функция представлена нулевым компонентом Фурье [28], который согласно рис 2. (кривая 2) может быть аппроксимирован экспоненциально-косинусной функцией. Для более детального анализа статистических свойств оценок параметров приливных волн необходим анализ корреляционной структуры как каждой из этих волн, так и взаимодействующих с приливами процессов  $\varepsilon(t)$ .

В табл. 4 приведены оценки амплитуд  $|\sigma_k|$  и фаз  $|\psi_k|$  компонентов  $\sigma_k$  стохастической составляющей приливных колебаний уровня моря, вычисленных по модели ППКСП. Оценки амплитуд  $|m_k|$  и  $|\sigma_k|$  сопоставлены на рис. 2 (графики 3,4). Из табл. 4 и рис. 2 следует, что вклад стохастической составляющей в приливные колебания уровня моря относительно невелик. Это наглядно иллюстрируют данные табл. 5, где приведены оценки коэффициента вариации  $\gamma_k$  (18). Из нее следует, что  $|\sigma_k|$  соизмерима или даже превосходит  $|m_k|$  только у тех волн, вклад которых в приливную ритмику относительно мал.

Таблица 5

Коэффициент вариации  $\gamma_k = \frac{|m_k|}{|\sigma_k|}$  приливных колебаний уровня моря и проекций скорости течения для основных приливных волн

№ ряда	Суточные волны				Полусуточные волны				Мелководные волны			
	O <sub>1</sub>	K <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	K <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	M <sub>4</sub>	MS <sub>4</sub>	S <sub>4</sub>	M <sub>6</sub>
Уровень моря												
1	0.64	0.06	0.18	0.27	0.05	0.10	0.29	0.19	0.39	0.15	1.50	0.10
2	0.02	0.14	0.17	0.17	0.07	0.05	0.30	0.19	1.10	1.60	10.6	2.20
3	0.04	0.04	0.12	0.06	0.06	0.08	0.06	0.24	0.31	0.14	2.91	0.56
Скорость течения												
4	1.75	5.72	15.13	5.33	0.18	0.15	0.76	2.74	6.59	1.08	1.11	1.31
5	1.96	6.36	3.59	3.07	0.22	0.29	1.10	3.35	5.70	1.15	0.90	1.21
6	0.86	0.40	1.38	2.17	0.27	0.36	3.09	1.47	17.8	15.6	12.9	7.69
7	1.48	0.50	2.65	3.88	0.23	1.00	3.36	1.99	10.9	10.0	5.97	14.5

**Примечание.** В первой графе (№ ряда) номера те же, что и в табл. 2.

На рис. 1 представлены графики регулярной составляющей приливных колебаний уровня моря, вычисленные по параметрам компонентов  $m_k$  (кривая 2), и неприливногo остатка (кривая 3). Графики оценок  $S(\omega)$  (стационарное приближение) неприливногo остатка показаны на рис. 2 кривой 2. Видно, что центрирование исходных данных на  $m(t)$  почти полностью (но все же не целиком) удаляет пики на приливных частотах. Анализ многочисленных данных измерений показывает, что вклад регулярной составляющей  $m(t)$  в приливные колебания уровня

моря является определяющим во всех районах Мирового океана. Незначительность вклада мелководных волн в приливную ритмику является не глобальной, а местной особенностью.

На рис. 2 приведены графики оценок спектральной плотности  $S_{\vec{V}}(\omega)$  (стационарное приближение) в инвариантной форме бароклинной составляющей скорости течения  $\vec{V}(t)$  в Гренландском море на горизонте 1600 м (ряд 7 из табл.2), где приливные колебания обусловлены внутренними волнами приливного происхождения и суммарного течения в Тазовской губе (ряд 5 из табл. 2). Анализ графика линейного инварианта  $I_1(\omega)$  (кривая 5), который [29] характеризует распределение в частотной области общей интенсивности колебаний  $\vec{V}(t)$ , показывает, что основные энергонесущие зоны локализованы в области приливных частот. Так, для Гренландского моря характерны приливные колебания  $\vec{V}(t)$  смешанного типа при некотором преобладании полусуточных над суточными, а для Тазовской губы – полусуточные колебания и относительно небольшие по интенсивности мелководные  $\frac{1}{4}$  - суточные. Отметим, что для приливных колебаний скорости течений характерны более размытые пики  $S(\omega)$ , чем для приливных колебаний уровня моря, что особенно заметно в Гренландском море в диапазоне суточного прилива. Относительный вклад различных гармоник в суммарные полусуточные колебания скорости течений примерно такой же, как и для уровня моря, тогда как в диапазоне суточных приливных колебаний скорости течений в Гренландском море несколько увеличен вклад волн  $K_1, P_1$ . Инвариант  $\vartheta(\omega)$  тензора  $S_{\vec{V}}(\omega)$ , называемый индикатором вращения, позволяет оценить распределение в частотной области интенсивности изменчивости, обусловленной разворотом векторов  $\vec{V}(t)$  [29]. В Гренландском море в диапазоне полусуточного прилива должно происходить вращение  $\vec{V}(t)$  против часовой стрелки, т.к.  $\vartheta(\omega) < 0$ , а в диапазоне суточного прилива – по часовой стрелке, причем эллипс волны  $K_1$  должен быть сильно сжат, так как на этой частоте  $I_1(\omega) \gg |\vartheta(\omega)|$ . В условиях узкого залива (Тазовская губа)  $\vartheta(\omega) \approx 0$ , что свидетельствует о преимущественно реверсивном характере изменчивости  $\vec{V}(t)$  на всех частотах.

В табл. 3 приведены оценки амплитуд  $|m_k|$  и фаз  $|\varphi_k|$  компонентов  $m_k$  регулярной составляющей приливных колебаний проекций скорости течения на меридиан и параллель, а на рис. 2 компоненты  $\vec{m}_k$  представлены в векторной форме в виде эллипсов и их осей (линии 9) и годографов (линии 10), параметры которых вычислены по данным табл. 3. Как и следовало ожидать по данным  $S_{\vec{V}}(\omega)$ , эллипсы  $\vec{m}_k$  в Тазовской губе и эллипс  $\vec{m}_{K_1}$  в Гренландском море сильно сжаты, а оси эллипса  $\vec{m}_{M_2}$  в Гренландском море соизмеримы, и вращение на этой частоте происходит против часовой стрелки. Отметим также, что по данным табл. 3 в рассмотренных случаях характер приливных колебаний не сильно изменяется по вертикали.

В табл. 4 приведены оценки амплитуд  $|\sigma_k|$  и фаз  $|\psi_k|$  компонентов  $\sigma_k$  стохастической составляющей приливных колебаний проекций скорости течения на меридиан и параллель, а на рис. 2 показаны оси эллипсов среднеквадратического отклонения (СКО) в моменты минимума и максимума  $\sigma_{\bar{V}}^{(k)}(t)$  на соответствующем приливном периоде. В Тазовской губе регулярные приливные колебания  $\bar{V}(t)$  существенно превосходят стохастические, что по данным табл. 5 обусловлено характером движений на частотах наиболее значимых гармоник  $M_2$  и  $S_2$ . В результате пики на графиках  $S_{\bar{V}}(\omega)$  неприливногo остатка (рис. 2, кривые 7, 8) исчезают. Но даже и в этом случае коэффициенты вариации  $r_{M_2}, r_{S_2}$  (табл. 5) существенно больше, чем у приливных колебаний уровня моря. Возможно, что такая устойчивость приливных колебаний  $\bar{V}(t)$  обусловлена не местными особенностями, а коротким временем наблюдений (12 суток по данным табл. 1). В Гренландском море регулярная и стохастическая составляющие соизмеримы и пики на графиках  $S_{\bar{V}}(\omega)$  неприливногo остатка сохраняются. Более того, регулярные и стохастические составляющие приливных колебаний  $\bar{V}(t)$  различаются даже по характеру – у регулярной составляющей преобладает полусуточный прилив, а у стохастической – суточный. Графики модуля и направления неприливногo остатка скорости течения (рис. 1, кривая 3) наглядно показывают, что приливные колебания довольно сложного характера сохраняются во временных рядах и после центрирования на регулярный компонент приливной ритмики. Регулярные приливные колебания  $\bar{m}(t)$  имеют линейчатый спектр, а размытый спектр  $S_{\bar{V}}(\omega)$  (рис. 2) процесса  $\bar{V}(t)$  обусловлен стохастической составляющей приливных движений.

Анализ многочисленных данных измерений в различных районах Мирового океана показывает, что частотно-временная структура взаимодействующих с приливами процессов весьма разнообразна, и деформация ими регулярного прилива проявляется по-разному. Обсуждение этой достаточно сложной проблемы выходит за рамки настоящей статьи.

### **Выводы.**

1. Приливные движения в океанах и морях проявляются всегда на фоне и во взаимодействии с другими гидродинамическими процессами, поэтому для оценивания амплитуд и фаз приливных колебаний уровня моря, внутренних волн и скорости течений используются гармонический и спектральный анализ, а также фильтрационный и ППКСП методы, взаимно дополняющие друг друга.

2. В зависимости от длины реализации, принятого метода ее анализа и модели взаимодействия прилива с другими процессами оценки амплитуд и фаз приливных движений будут содержать те или иные погрешности.

3. Основным методом оценивания параметров приливных движений является гармонический анализ, однако зависимости результатов этого анализа от внешних факторов придается вероятностная трактовка с учетом коэффициента изменчивости «гармонических постоянных» и нелинейности взаимодействия прилива с не астрономическими факторами. Спектральный анализ реализаций в стационарном приближении целесообразен на стадии как предварительного аргументирования модели взаимодействия прилива с другими процессами, так и определения остаточного процесса после исключения (отфильтровывания) приливных движений. Метод ППКСП наиболее эффективен для изучения внутренних волн приливного происхождения и формируемых ими течений в бароклинном океане, где их взаимодействие приводит к стохастизации амплитуд и фаз колебаний.

Статья подготовлена при поддержке РФФИ – Грант № 01-04-48822.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Doodson A. T. The harmonic development of the tide-generating potential// Intern. Hydrogr. Rev., - 1954. - Vol. XXXI. - N1. P. - 29-61
2. Cartwright D. E., Tayler R. J. New computation of the tide-generating potential// Geophys. J. R. Astr. Soc. – 1971. - Vol. 23. - N1. P. - 45-74
3. Doodson A. T., Warburg N. D. Admiralty Manual of Tides. - London, 1941. - 261 p.
4. Дуванин А. И. Приливы в море. Л.: Гидрометеоздат, 1960. - 390 с.
5. Ржосницкий В. Б. Приливные движения. Л.: Гидрометеоздат, 1979. - 243 с.
6. Марчук Г. И., Каган Б. А. Динамика океанских приливов. Л.: Гидрометеоздат, 1991. - 472 с.
7. Franko A. S. On the shallow-water tidal constituents// Intern. Hydrogr. Rev. – 1980. - Vol. LVII. - N2. P. - 141-150.
8. Munk W. H., Cartwright D.E. The tidal spectroscopy and prediction// Phil. Trans. R. Soc. – 1966. – A. Vol. 259. – N 1105. - P.533-581.
9. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Изд ФМ, 1962. С. 349
10. Войнов Г. Н. Приливные явления в Карском море. СПб.: Изд-во РГО, 1999ю - 110 с.
11. Munk W., Yfsselman K. Super-resolution of tides. // Studies on oceanography. – 1964. - P. 339-354.
12. Godin G. The resolution of tidal constituents // Intren. Hydrographic Reiew. - 1970, Vol. 447. - N 2. – P. 133-144.
13. Альтшулер В. М., Сустанов Ю. В. Опыт анализа приливных течений в океане. Труды ГОИН. – 1970. Вып. 100. С. 58 – 70.
14. Альтшулер В. М. Практические вопросы анализа и расчета морских приливов. Л.: Гидрометеоздат, 1966. - 311 с.
15. Войнов Г. Н. Рационализация Адмиралтейского метода анализа приливов за 24 часа для расчетов на ЭВМ. // Тр. ААНИИ. – 1989. - Т. 417. - С. 128-139.
16. Войнов Г. Н. Приливные явления в шельфовой зоне Арктических морей (на примере Карского и Баренцева морей). Автореферат ... докт. географ. н. СПб, 2000. 41 с.
17. Коняев К. В., Сабинин К. Д. Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. - 272 с.
18. Морозов Е. Г. Океанические внутренние волны. М.: Наука, 1985. – 151 с.
19. Прохоров Ю. В., Розанов Ю. А. Теория вероятностей. М.: Наука, 1967. - 496 с.
20. Webb D. J. Green's function and tidal prediction // Rev. Geoph. and Space Phys. – 1974. - V. 12. – N 1. - P.103-116.
21. Galagher B. S., Munk W. H. Tids in shallow water: Spectroscopy. // Tellus. – 1971. - Vol. XXIII. N 4-5. P. 346-363.
22. Doodson A. T. The harmonic development of the tide-generating potential // Intern. Hydrogr. Rev. – 1954. - Vol. XXXI.- N1. - P.29-61.
23. Селецкая Е. С., Фукс В. Р. Особенности гармонического и корреляционного анализа внутренних приливных волн. // Сб. «Исследования приливных явлений в неоднородном море». Под ред. В. В. Тимонова. - Л.: Гидрометеоздат, 1965. - С. 56-72.
24. Башмачников И. Л Баротропная и бароклинная составляющие приливного потока в различных районах Мирового океана и их роль в динамике экосистем. Автореферат ... канд. геогр. н. - СПб., 1999. - 17 с.
25. Бухтеев В.Г. Некоторые закономерности изменчивости параметров внутренних волн. // Сб. «Исследования приливных явлений в неоднородном море». Под ред. В. В. Тимонова. Л.: Гидрометеоздат, 1965. - С. 100-109.
26. Фукс В. Р. Внутренние приливные волны как случайный процесс. //Сб. «Исследования приливных явлений в неоднородном море». Под ред. В. В. Тимонова. Л.: Гидрометиздат, 1965. - С. 142-148.
27. Краусс В. Внутренние волны. Л.: Гидрометеоздат, 1968. - С. 271.
28. Драган Я. П., Рожков В. А. Яворский И. Н. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов. Л.: Гидрометеоздат, 1987. - 319 с.



29. Рожков В. А. Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб.: Прогресс-Погода, 1997. - 559 с.
30. Wedemeyer A. Die Berchnung der Elemente Gezeitenstromellipsen // Ann. t. Hydr. N. U. Marit Met. –1931. - Heft 9. - P. 339-341.
31. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Книга 1. М.: Финансы и статистика, 1986. - 366 с.
32. Рожков В. А. Методы вероятностного анализа океанологических процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. - 280 с.

ГРНТИ 37.25.19

### **АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЙ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

**С. И. МАСТРЮКОВ**  
**А. Ю. УСТИМЕНКО**  
(ГНИНГИ МО РФ)

*В статье приведены результаты анализа и обработки наблюдений за течениями в южной части Баренцева моря, указаны основные причины погрешности выполненных измерений.*

*Приведена оценка характеристик как приливных, так и непериодических течений. Даны результаты предвычисления приливных течений. Предложены пути уточнения гармонических постоянных течений. Указаны области использования результатов расчета.*

На этапе заблаговременного планирования морских операций в ряде случаев важную роль играет информация о режиме морских течений, в состав которой входят сведения о статистических характеристиках течений. Такая информация может быть получена путем обработки данных натурных наблюдений, собранных в НИЦ ГНИНГИ МО РФ и других мореведческих организациях страны.

Однако в ряде случаев, особенно для обеспечения важных операций, требуются не только статистические характеристики режима течений, но и результаты их предвычисления или моделирования на тот или иной момент времени. Для решения этой задачи, как правило, требуется предварительное доизучение течений в районе проведения операции.

Примером успешных действий по обеспечению важной морской операции по подъему атомной подводной лодки (АПЛ) «Курск» являются действия Гидрографической службы Северного флота по НГО и ГМО этой спасательной операции. Заблаговременно в период с 1.10 по 25.11.2000 г. в рассматриваемом районе войсковой частью 63988 были выполнены специализированные экспедиционные исследования течений с постановкой двух буйковых станций ОИС «Семен Дежнев». Целью этих исследований, как отмечается в отчете [1], явилось получение данных о направлении, о минимальных, максимальных и осредненных скоростях придонных течений.

В настоящей работе проведен анализ течений и расчет гармонических постоянных приливных течений по данным ежечасных наблюдений ОИС «Семен Дежнев». Расчет этих характеристик позволяет предвычислять приливные течения в указанном районе на любой момент времени и тем самым

учитывать их как на этапе заблаговременного планирования операции, так и при оперативном планировании и управлении операцией.

Аппарат расчета гармонических постоянных давно разработан и относится к классическим методам океанографических исследований [2]. Чаще он используется для обработки уровенных наблюдений на прибрежных постах. В последние годы внимание к методам расчета течений возросло, и в некоторых странах они формализованы в виде нормативно-методических документов [3].

В отличие от расчета приливных колебаний уровня использование классического метода расчета гармонических постоянных течений осложняется рядом факторов, среди которых следует отметить нелинейное взаимодействие течений различной природы, относительно невысокую точность измерения течений и практически полное отсутствие длительных наблюдений за течениями в одной точке.

Погрешности измерения течений с помощью приборов, устанавливаемых на буйковых станциях, наряду с погрешностями самих датчиков, дополняются погрешностями работы часового механизма приборов и сложным движением всей измерительной системы под воздействием ветра, волнения и течений. Как отмечается в отчетных материалах [1], вместе с естественными динамическими факторами на работу приборов, повлияли динамические удары, вызванные неоднократным применением противолодочного оружия в целях противодействия ПДСС в непосредственной близости от мест установки плавучих автономных буйковых станций (ПАБС). Эти удары могли стать причиной не только дополнительных погрешностей в измерении течений, но и причиной выхода из строя ряда приборов.

Указанные обстоятельства потребовали перед расчетом гармонических постоянных оценить достоверность всех выполненных наблюдений для построения их продолжительного временного ряда.

В ходе работ с ОИС «Семен Дежнев» было выставлено две автономных буйковых станции (АБС). На АБС №1 были установлены приборы АЦИТ на горизонтах 80 и 100 м, а также БПВ-2 на горизонте 105 м с дискретностью измерений 1 час. На АБС №2 были установлены АЦИТ на горизонте 100 м и БПВ-2 на горизонте 105 м. Период наблюдений за течениями с помощью указанных приборов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Период наблюдений за течениями на ПАБС №1 и №2

ПАБС	Прибор	Z, м	октябрь						ноябрь			
			1-4	5-9	10-15	16-20	21-25	26-30	1-7	7-15	16-20	21-25
№1	АЦИТ	80	■		■	■	■	■				
	АЦИТ	100	■		■	■	■	■				
	БПВ-2	105	■		■	■	■	■				
№2	АЦИТ	100							■			
	БПВ-2	105							■	■	■	■

Пропуски в рядах наблюдений АЦИТов вызваны сбоями в работе или полным выходом из строя их датчиков.

Основные усилия при предварительном анализе были сосредоточены на точной временной привязке результатов наблюдений. Сравнение паспортных данных о времени постановки ПАБС и сведений о времени начала и конца наблюдений тем или иным прибором выявило их противоречие. В результате анализа этих данных, исходя из того, что наблюдения не могли быть выполнены до установки станции и после ее снятия, были сделаны предварительные выводы по уточнению систем отсчета времени приборами АБС. Дополнительный анализ экстраполированных значений параметров течений на период между снятием АБС №1 и постановкой АБС №2, а также взаимный корреляционный анализ наблюдений на БПВ-2 в октябре и ноябре 2000 г. при различных сдвигах рядов по времени позволили привести наблюдения к единой системе отсчета времени.

Вместе с тем, не удалось исключить вероятность того, что наблюдения БПВ-2 на АБС №1 были начаты по поясному времени с учетом «декретного» летнего часа, а приведение времени выполнено по времени снятия станции уже без «декретного часа» или наоборот. Не найдено объяснения, почему одна и та же БПВ-2 на первой станции имела дискретность наблюдений меньше чем на второй.

Для оценки достоверности работы приборов и их часовых механизмов был выполнен расчет коэффициентов взаимной корреляции составляющих течений на различных горизонтах, приведенных к одной системе отсчета времени. Возможность такого анализа обусловлена известным свойством приливных течений – их однородностью по глубине.

Результаты расчета коэффициентов взаимной корреляции между наблюдениями за составляющими течений на параллель – U и меридиан - V на различных горизонтах на ПАБС № 1 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты взаимной корреляции составляющих течений на различных горизонтах

Составляющая	U (на параллель)			V (на меридиан)		
	горизонты	105-80	100-80	105-100	105-80	100-80
10-19 октября	0.915	-	-	0.921		
20-30 октября	0.03	0.182	0.914	-0.155	0.203	0.797

Анализ приведенных в табл. 2 данных позволяет достаточно уверенно предположить, что наблюдения АЦИТом, установленным на горизонте 80 м, начиная с 0 часов 20 октября недостоверны. Причиной сбоя, скорее всего, является нарушение работы часового механизма.

В то же время результаты наблюдений на БПВ-2 (105м) подтверждены результатами наблюдений на других горизонтах в периоды 1-3 октября, 10-30 октября и 1-7 ноября, поэтому данные именно этого прибора следует признать наиболее достоверными.

Общее представление о характере течений в районе дает рис.1, где показана прогрессивно-векторная диаграмма течений, измеренных на различных горизонтах.

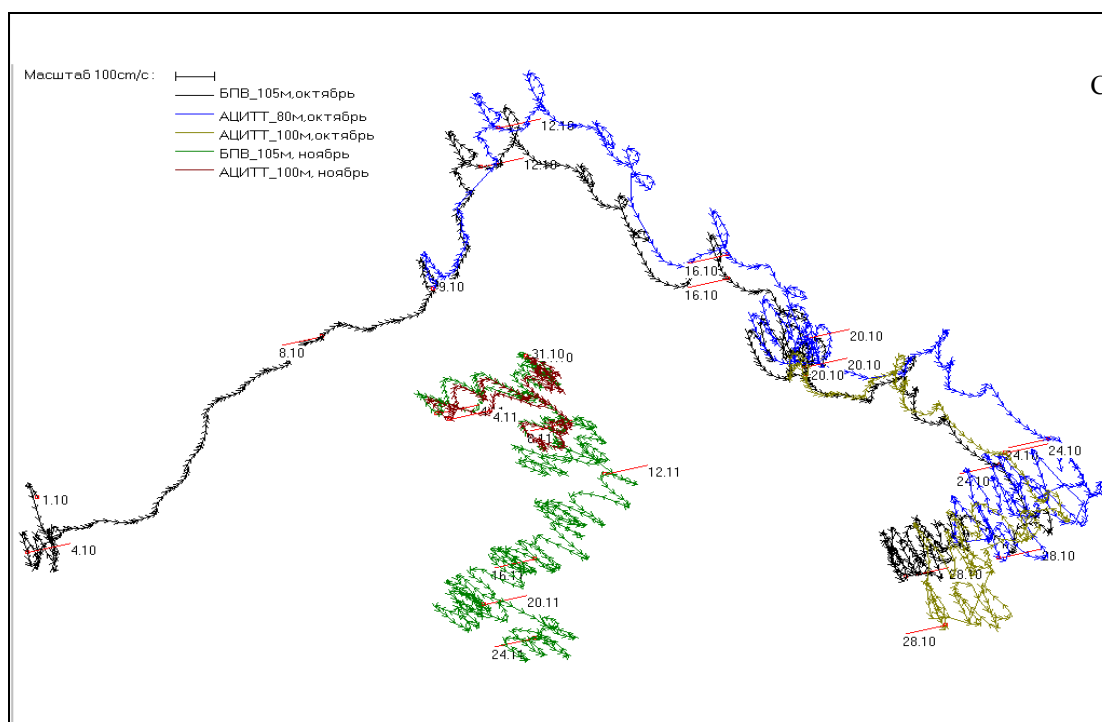


Рис. 1. Прогрессивно-векторная диаграмма течений, измеренных ОИС «Семен Дежнев» в октябре и ноябре 2000 г.

Анализ вертикальной структуры течений не является основной целью настоящей работы. Однако для получения общего представления о ней в табл. 3-4 приведены сведения о повторяемости течений по градациям скорости и направления, полученные по данным исходных наблюдений. Кроме этого, в табл. 3 даны некоторые статистические характеристики скорости течений по горизонтам.

Для сравнения в табл. 5 показана повторяемость течений по градациям скорости и некоторые статистические характеристики течений в районе с координатами 69.5–71.0° с.ш., 33.0-39.0° в.д., полученные по историческим данным НИЦ ГНИНГИ МО. Отметим, что средний вектор течения, полученный путем осреднения всех имеющихся данных невелик, направление среднего (постоянного) течения для слоев 5-25 м, 26-99 м, 100-150 м составляет 56, 79 и 135 градусов соответственно, а модуль скорости не превышает 2 см/с.

Таблица 3

Повторяемость течений на горизонтах 80-105м по диапазонам скорости, % (ОИС «Семен Дежнев»)

Диапазон	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	>70	V <sub>ср</sub> , см/с	СКО см/с	V <sub>max</sub> см/с	Кол-во
80м	20.1	33.1	31.0	10.9	2.2	0.4	0.4	1.5	19.9	13.9	100	532
100м	25.0	40.2	23.2	9.6	0.7	0.2	0.4	0.6	17.0	11.0	89	448
105м	20.4	37.9	33.2	8.1	0.4				17.3	8.5	46	1293

Таблица 4

Повторяемость течений на горизонтах 80-105м по диапазонам направления, %  
(ОИС «Семен Дежнев»)

Горизонт, м	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
80	19.9	17.0	9.6	16.0	24.6	5.1	2.8	5.1
100	18.3	12.3	8.9	18.8	22.6	4.5	3.6	11.2
105	15.7	12.8	10.7	21.7	16.9	4.7	2.9	14.6

Таблица 5

Повторяемость течений в р-не 69.5 –71.0 °с.ш., 33.0-39.0 ° в.д. по диапазонам скорости, %  
(исторические данные)

Диапазон	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	>70	V <sub>ср</sub> см/с	СКО см/с	V <sub>max</sub> см/с	Кол- во
5..25м	21.3	26.4	20.4	15.4	10.2	4.9	1.3	0.1	23.3	15.0	95	1984
26..99м	25.8	33.5	29.5	9.2	2.0	0.1	0	0.1	17.2	10.2	86	2591
100..150м	29.6	38.1	24.2	6.9	0.9	0.2	0	0	15.5	9.4	57	1974

Отметим, что зарегистрированные ОИС «Семен Дежнев» максимальные скорости течения на горизонтах 80, 100 и 105 м составляют 100, 89 и 46 см/с, соответственно. При этом следует подчеркнуть, что значения скорости, превышающие 60 см/с, носят характер выбросов и не подкреплены наблюдениями на соседних горизонтах в тот же срок или в ближайший час.

При допущении о нормальном законе распределения, исходя из известных средних значений скорости и их средних квадратических отклонений (табл. 3) максимальные значения скорости можно было бы оценить следующими величинами: на горизонте 80м - 62 см/с, на горизонте 100м – 50 см/с, на горизонте 105 м – 43см/с.

Анализ приведенных иллюстраций и сведений (табл. 3, 4) показывает, что течения в слое 80-105 м достаточно однородны, течения на глубинах 100 и 105 м практически совпадают по скорости и направлению, а на глубине 80 м скорость течений, совпадая по направлению, в среднем на 3 см/с выше, чем на придонных горизонтах.

Возрастание скорости течений, превышающее в отдельные сроки наблюдений 60 см/с, можно объяснить кратковременным усилением непериодических течений или движениями измерительной системы.

Роль достаточно изменчивых ветровых течений на рассматриваемых глубинах весьма невелика, а другие непериодические составляющие суммарных течений не испытывают столь резких колебаний. Поэтому скорости течения, измеренные на глубине 80 м и превышающие 70 см/с, наиболее вероятно, являются выбросами, вызванными движением измерительной системы. Приборы, наиболее удаленные от якоря, должны испытывать и наибольшие ускорения в ходе движения этой системы.

На рис. 2 представлен ход среднесуточных непериодических течений на горизонте 105 м, а также изменение среднесуточной скорости ветра в районе работ в октябре 2000 г. Расчет непериодических течений выполнялся путем осреднения данных непосредственных наблюдений за 24 часа, что позволило

отфильтровать приливные течения. Как видно из рисунка, скорость среднесуточных непериодических течений достигает 15 см/с, и их изменение не вызвано воздействием локального ветра. Видимо, основную роль в непериодических течениях представляют собой градиентные течения, вызванные наклоном уровенной поверхности в южной части Баренцева моря.

Отметим, что для расчета и предвычисления таких течений могут быть использованы численные модели, основанные на теории мелкой воды. Такого рода модели в последние годы нашли широкое применение в практике гидрометеорологического обеспечения, имеется опыт разработки таких моделей и в ГНИНГИ МО [4, 5].

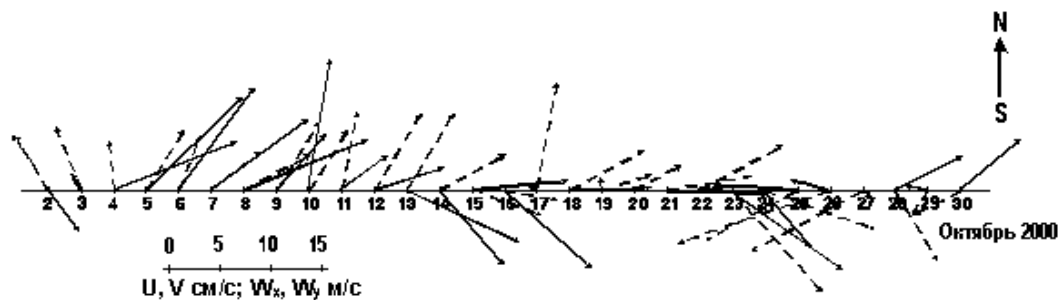


Рис. 2. Ход среднесуточных непериодических течений на глубине 105 м (—) и среднесуточной скорости ветра (- - -)

Таким образом, наиболее достоверными были признаны данные наблюдений БПВ-2 на горизонте 105 м. Для снижения роли погрешностей измерений при расчете гармонических постоянных течений использовались все данные наблюдений на этом горизонте.

Для расчета гармонических постоянных 11 основных приливных волн применялся традиционный метод гармонического анализа.

Единственное изменение в расчет числа дней от начала основной эпохи было внесено для расчета долготы восходящего узла лунной орбиты и других астрономических характеристик. Используемое ранее выражение применимо только для прошлого столетия, поскольку в качестве аргумента брались две последние цифры года. При использовании в качестве аргумента дополнения от начала основной эпохи (0 часов 1 января 1900) до любого последующего года эта «проблема 2000» не возникает.

Для составляющих течения на параллель и меридиан (около 1300 наблюдений) составлялась система линейных уравнений, содержащая 22 неизвестных (амплитуды и фазы 11 основных гармоник прилива), которая с применением метода наименьших квадратов приводилась к нормализованной системе из 22 уравнений с 22 неизвестными. Решение полученной системы осуществлялось с использованием метода Гаусса.

По результатам расчета гармонических постоянных приливных течений в районе можно отметить, что суммарная амплитуда полусуточной группы приливных волн составляет 25 см/с, а суточной – 10 см/с. Исходя из этого максимальная скорость приливного течения на глубине 105 м может достигать 35 см/с.

Характерный вид годографа приливного течения представлен на рис. 3. На нем изображен вектор течения в каждый час приливного цикла, цифрами указаны часы приливного цикла от момента малой воды.

На рис. 4 приведены результаты предвычисления составляющей приливных течений на

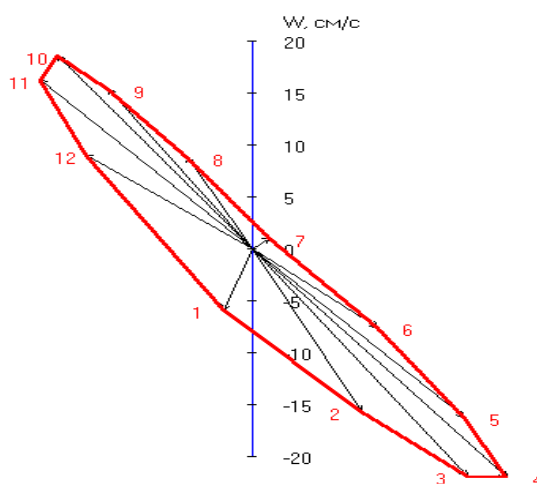


Рис. 3. Годограф приливного течения

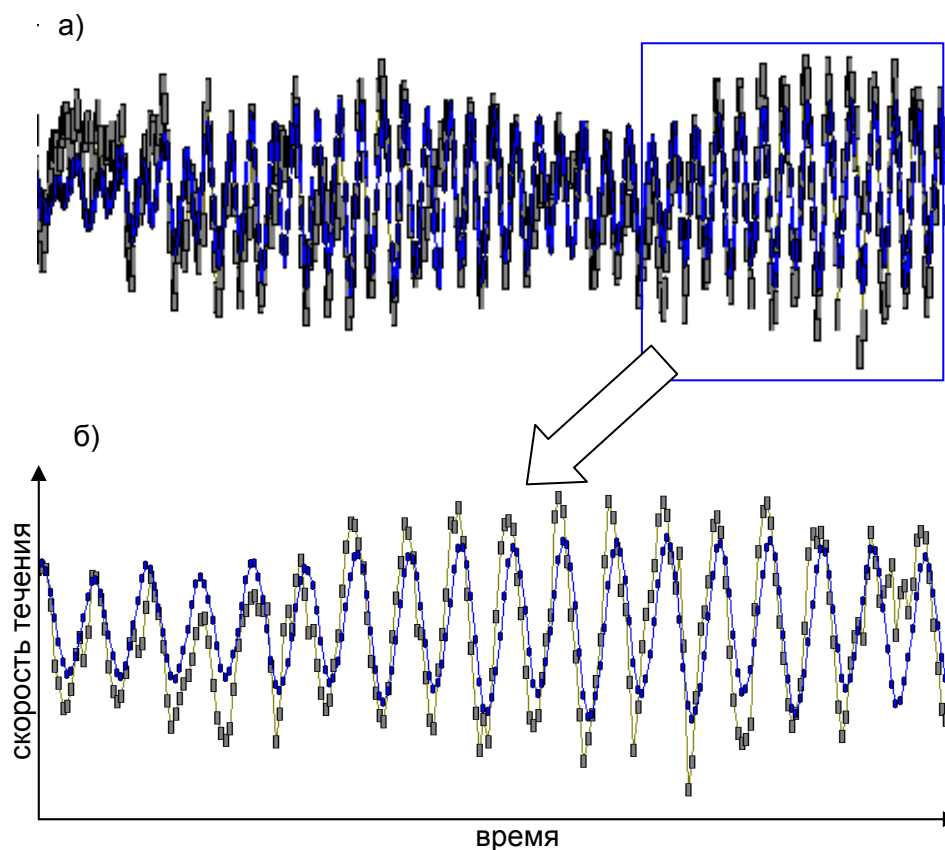


Рис. 4. Результаты предвычисления (черная линия) приливных течений и данные измерений составляющей суммарных течений (серая линия) на меридиан 2-30 октября (а); фрагмент – (б)

меридиан в октябре 2000 года (черная линия) и ход соответствующей составляющей суммарных (измеренных) течений в районе (серая линия).

Следует обратить внимание на следующие важные, на наш взгляд, обстоятельства:

1. Расчет фаз приливного цикла выполняется удовлетворительно (отклонением моментов экстремумов не более, чем на 1 час), что свидетельствует об отсутствии существенной ошибки в определении систем отсчета времени.
2. Форма огибающей составляющих приливных течений воспроизводится удовлетворительно, что свидетельствует о правильном расчете астрономических характеристик.
3. Амплитуда расчетных приливных колебаний составляющих течения занижена по отношению к фактическим данным в сизигию – на 15-20%, а в квадратуру – на 20-30%.

Причиной занижения амплитуды составляющих приливных течений являются погрешности измерения течений, включая отмеченные в отчетных материалах [1] сбои в работе часового механизма БПВ-2.

Таким образом, при расчете гармонических постоянных приливных течений особое значение имеет предварительный анализ достоверности данных исходных наблюдений и их продолжительность. Для оценки «постоянства» гармонических постоянных приливных течений требуется выполнение дополнительных исследований разнесенных по времени продолжительных натурных наблюдений. Выполнение этих исследований, а также сравнительный анализ существующих методов расчета гармонических течений может позволить сформулировать требования к производству наблюдений за течениями, организовать работу по расчету гармонических постоянных по данным исторических наблюдений за течениями и расширить применение методов предвычисления приливных течений.

В заключение авторы выражают благодарность А. И. Яновскому и В. Н. Костину за консультации по расчету астрономических аргументов характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Научно-технический отчет «Океанографические исследования, выполненные с ОИС «Семен Дежнев» в Баренцевом море в октябре 2000г.». - Том 3, в/ч 63988. – 2001. - 195с.
2. Дуванин А. И. Приливы в море. - Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1960, - 390 с.
3. Foreman M. G. G. Manual for tidal currents analysis and prediction // Pacific Marine Science report. No 78-6. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sydney, revised edition. - 1993. - 66 p.
4. Матрюков С. И., Веренчиков Н. Н. Адаптивная гидродинамическая модель приливных колебаний уровня Белого моря // Метеорология и гидрология. – 1997. - N2. - С. 68-73.
5. Матрюков С. И. Математическая модель как ядро системы гидрологического и экологического мониторинга бассейна Невской губы // Мониторинг. Безопасность жизнедеятельности. – 1996. - №1. - С. 5-10.



---

## ВОПРОСЫ ИСТОРИИ

---

ГРНТИ 78.19.07

### **О ПОДГОТОВКЕ НАУЧНЫХ КАДРОВ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ В ОБЛАСТИ ВОЕННОЙ НАВИГАЦИИ, ГИДРОГРАФИИ, ГЕОФИЗИКИ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ**

**П. Г. БРОДСКИЙ,  
Б. Е. ИВАНОВ,  
А. П. ВАСИЛЬЕВ**  
(ГНИНГИ МО РФ)

*Описывается организация подготовки докторов и кандидатов наук в ГНИНГИ МО РФ, история создания и функционирования первого в стране докторского диссертационного совета в области военной навигации, военной гидрографии, геофизики и гидрометеорологии.*

Развитие средств и методов навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения (НГГМО) ВМФ в современных условиях немыслимо без военной науки. Основой научного потенциала являются научные кадры. Подготовка кадров высшей квалификации и создание необходимых условий для их плодотворной работы является одной из важнейших государственных задач.

Основной научный потенциал в области НГГМО ВМФ сосредоточен в Государственном научно-исследовательском навигационно-гидрографическом институте МО РФ (ГНИНГИ МО РФ), в Военно-Морской академии, на Высших специальных офицерских классах ВМФ, в Морском корпусе Петра Великого – Санкт-Петербургском военно-морском институте, а также в центральных и флотских организациях, занимающихся научными исследованиями. Наиболее существенная часть высококвалифицированных ученых в области военной навигации, военной гидрографии, геофизики и гидрометеорологии трудится в стенах ГНИНГИ МО РФ.

Длительное время (до 1988 г.) соискатели ученой степени кандидата наук в указанной области имели возможность защищать свои работы в диссертационном совете ВВМУ им. М. В. Фрунзе (ныне Морском корпусе Петра Великого – Санкт-Петербургском военно-морском институте), а соискатели докторской степени были вынуждены ориентировать свои работы на смежные специальности. Такая ситуация сдерживала получение степени доктора наук в области НГГМО ВМФ, что особенно остро проявилось при подготовке научных кадров высшей квалификации в ГНИНГИ МО РФ.

На протяжении целого ряда лет командование института неоднократно предпринимало попытки создания докторского диссертационного совета по военной навигации, военной гидрографии, геофизике и гидрометеорологии.

Главным препятствием было отсутствие в ГНИНГИ необходимого числа докторов наук. Сложилась парадоксальная ситуация - для того чтобы создать совет в институте должно быть большое число докторов наук, а чтобы увеличить их количество, необходимо создать совет. Первым шагом в этом направлении было появление в 1970 г. в ГНИНГИ диссертационного совета с правом проведения разовых защит диссертаций. Тогда первые кандидатские диссертации в стенах института защитили Ю. В. Покровский и В. Д. Чумаков.

Следующий, наиболее существенный шаг был сделан в то время, когда начальником института был кандидат военных наук А. В. Федотов, который вместе со своим заместителем кандидатом технических наук Ю. С. Дубинко приложил немало усилий для подготовки необходимого числа докторов наук. Они сумели убедить командование ВМФ и руководство Высшей аттестационной комиссии (ВАК) СССР в необходимости создания диссертационного совета в ГНИНГИ. В результате в 1988 году в институте появился первый в стране докторский диссертационный совет по двум специальностям: «Военная навигация. Средства и методы» и «Военная гидрография и океанография, военная метеорология, гидрометеорология, геофизика». Совет обладал также правом проводить защиты диссертаций по закрытой тематике на соискание ученой степени доктора (кандидата) технических (военных) наук. В состав совета вошли доктора наук: Н. Т. Астапов, Б. Н. Беляев, Ю. А. Горбунов, Н. М. Груздев, Б. Е. Иванов, В. И. Кузнецов, А. П. Михайловский, А. Н. Мотрохов, А. В. Лаврентьев, В. И. Пересыпкин, В. И. Резниченко, Р. А. Скубко, В. Ф. Фатеев, Г. Г. Щукин и кандидаты наук В. А. Винклер, Ю. С. Дубинко, Р. Н. Михайлов. Данные о руководящем составе диссертационного совета в разные годы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав диссертационного совета в ГНИНГИ МО РФ

Дата утверждения	Председатель	Заместитель председателя	Ученый секретарь	Число членов	
				Всего	из ГНИНГИ
19.10.1988	Дубинко Ю. С.	Иванов Б. Е.	Винклер В. А.	17	7
04.04.1991	Иванов Б. Е.	Емельянец Г. И.	Винклер В. А.	21	10
02.10.1995	Макода В. С.	Иванов Б. Е.	Воробьев А. К.	21	11
27.12.2000	Алексеев С. П.	Добротворский А. Н.	Васильев А. П.	19	14

Созданный совет активно функционирует до сих пор с единственным перерывом (с 31 июля по 27 декабря 2000 года), имевшим место в связи с изменением номенклатуры специальностей и переутверждением диссертационного совета. В результате изменилось его наименование, номер и название специальностей, по которым совет имеет право проводить защиты диссертаций, сегодня это «Военные системы управления связи и навигации» по отраслям технической и военной науки и «Гидрометеорологическое и геодезическое обеспечение боевых действий войск» по отрасли технические науки. Смена наименований специальностей не изменила основного назначения диссертационного совета - проводить работу по аттестации специалистов в области НГГМО ВМФ - и только расширила круг потенциальных соискателей за счет слияния ряда специальностей. В совете также работают члены, обла-

дающие правом совещательного голоса – ведущие специалисты ГНИНГИ МО РФ, имеющие ученую степень кандидата или доктора наук. Они участвуют в научной экспертизе диссертационных работ как на стадии предварительного рассмотрения, так и во время защиты.

Для совершенствования подготовки специалистов высшей квалификации в 1991 году в ГНИНГИ был создан учебно-методический совет, руководство которым осуществлял доктор технических наук профессор Г. И. Емельянцев, а затем доктор военных наук П. Г. Бродский. Данный совет объединил в своем составе докторов наук института и был предназначен для оказания методической помощи сотрудникам при работе над диссертациями. Кроме того, на своих заседаниях он рассматривал научные работы адъюнктов и соискателей ученых степеней.

За время своего существования диссертационный совет провел защиты 12 диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и 43 диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Только две докторские диссертации были сняты соискателями с защиты на стадии предварительной экспертизы. Подтверждением тому, что ГНИНГИ является основой научного потенциала специалистов высшей квалификации в области НГГМО ВМФ, служит тот факт, что из 55 диссертаций, защищенных в диссертационном совете института, только 2 докторские диссертации подготовлены в других организациях. И это при том, что по своим специальностям докторский диссертационный совет института до 2001 года был единственным в своем роде, где могли защищаться специалисты в области навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения ВМФ.

Данные по числу диссертаций, защищенных в диссертационном совете института, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Число диссертаций, защищенных в диссертационном совете ГНИНГИ МО РФ

Год	Число диссертаций		Год	Число диссертаций	
	докторских	кандидатских		докторских	кандидатских
1989	2	3	1995	1	5
1990	1	6	1996	2	6
1991	---	6	1997	2	2
1992	2	4	1998	---	5
1993	1	---	1999	2	1
1994	---	2	2000	---	3

Благодаря работе диссертационного совета появилась возможность более интенсивной подготовки и аттестации научных кадров высшей квалификации, что незамедлительно сказалось на общем количестве дипломированных ученых в институте. С течением времени число сотрудников ГНИНГИ в диссертационном совете увеличилось (см. табл. 1). Стало возможным расширение и обновление состава диссертационного совета за счет молодых докторов наук. В настоящее время из первого состава совета в нем продолжают работать доктора наук Б. Н. Беляев, Н. М. Груздев, Б. Е. Иванов, А. В. Лаврентьев и В. И. Резниченко.

В разное время члены диссертационного совета Н. М. Груздев, Б. Е. Иванов, А. В. Лаврентьев, Н. Н. Неронов, А. И. Сорокин являлись также членами экспертного совета ВАК по проблемам флота и кораблестроения, проводили окончательную экспертизу диссертаций, выполненных по указанным проблемам.

В современных условиях перед командованием ГНИНГИ, перед научно-техническим, учебно-методическим и диссертационным советами института стоит непростая проблема подготовки кадров высшей квалификации и пополнения их молодыми талантливыми сотрудниками, имеющими тягу к научной деятельности в области НГГМО ВМФ. Одной из первоочередных задач является повышение качества научно-исследовательских работ и их объективная оценка с установлением степени их новизны, достоверности, а также теоретической и практической значимости полученных результатов.

---

## ЮБИЛЕИ

---

### **ГИДРОГРАФИЧЕСКОМУ ОБЩЕСТВУ – 10 ЛЕТ**

*В 1992 г. 28 апреля создано Гидрографическое общество.*

*Отрадно отметить, что с этого времени число его членов выросло от 25 до 237 человек. Они работают на просторах России от Камчатки и Владивостока до Санкт-Петербурга и Калининграда, от Мурманска и Архангельска до Новороссийска и Севастополя, а также в странах ближнего зарубежья. Все члены общества активно участвуют в научно-практической деятельности гидрографической службы страны.*

*За 10 лет существования обществом установлены связи с зарубежными гидрографическими обществами и с Международной гидрографической организацией в Монако. Производится обмен информацией с ними.*

*Совет общества принял участие в организации сертификации дипломов военных гидрографов ВМИ и выпускников ГМА им. адм. С. О. Макарова.*

*Общество выступило соучредителем журнала «Навигация и гидрография» и Российской научно-технической конференции «Современное состояние, проблемы навигации и океанографии», а также активным участником международного проекта «Уровень Балтийского моря» и международных конференций «Нева-2001».*

*Для отличившихся гидрографов и метеорологов установлены именные дипломы им. А. А. Белоброва и В. А. Снежинского.*

*Два раза в год обществом проводятся заседания за круглым столом, посвященные истории развития гидрографии.*

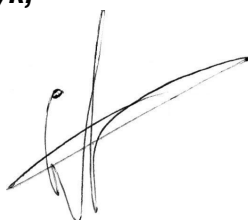
*Сейчас в обществе состоят два адмирала, 5 контр-адмиралов (Министерства обороны и Министерства транспорта), 16 докторов и 22 кандидата наук. При этом состав общества значительно омолодился. В начале 90-х годов средний возраст его членов составлял 55 лет, сейчас – 50 лет. Это говорит о том, что деятельность общества интересует курсантов училищ и молодых офицеров.*

*Желаю обществу дальнейшего развития и процветания на благо нашей гидрографической службы и всей страны.*

*Призываю членов гидрографического общества к активному участию в деятельности журнала "Навигация и гидрография".*

**Главный редактор журнала «Навигация и гидрография»,  
начальник ГНИНГИ МО РФ,  
доктор технических наук,**

**контр-адмирал**



**С. Алексеев**

## **«ЗАПИСКАМ ПО ГИДРОГРАФИИ» – 160 ЛЕТ**

*В 2002 году исполняется 160 лет журналу «Записки по гидрографии». Журнал является одним из главных источников сведений по истории развития методов и средств гидрографии, а также публикует статьи о новейших достижениях в этой области. По отзывам многих гидрографов, они знакомятся не только с материалами последних номеров журнала, но и внимательно просматривают то, что было опубликовано в нем в XIX-XX вв. Все это помогает прогнозировать перспективы создания новых методов и средств гидрографии.*

*Особую благодарность выражаем редакторам журнала, которые тщательно отбирают материалы для публикаций и уделяют большое внимание работе с их авторами.*

*Поздравляем редактора «Записок по гидрографии» со знаменательной датой - 160-летием со дня основания издания. Желаем журналу процветания и благополучия, а членам редколлегии – здоровья, счастья, радости и успехов в работе.*

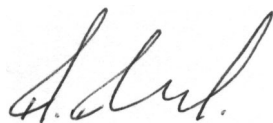
**Главный редактор журнала «Навигация и гидрография»,  
начальник ГНИНГИ МО РФ,  
доктор технических наук,**

**контр-адмирал**



**С. П. Алексеев**

**Председатель Гидрографического общества,  
доктор технических наук, профессор**



**Н. Н. Неронов**

---

## ABSTRACTS

---

**A. A. Komrityn, S. P. Alekseyev, P. G. Brodsky, V. G. Dmitriyev, A. N. Dobrotvorsky** Navigation-Hydrographic and Hydrometeorological Support for Maritime Activities in the Aspects of Stable Development

The article deals with international aspects in the area of navigation-hydrographic and hydrometeorological support (NH and HMS) and maritime activities in exploration and development of the World ocean. In particular, the necessity to create the adequate system of NH and HMS is determined by the tasks of the development of the marine shelf oil and gas fields, taking into consideration the scale and complexity of the prospecting and construction work, the specific features of physiographical and hydrometeorological conditions of the areas where they are carried out. The timely deployment of the system of prompt and effective hydrometeorological support is especially important for the remote water areas and nearshore areas difficult of access, irrespective of the national borders.

**P. G. Brodsky, V. G. Dmitriyev, A. N. Dobrotvorsky, M. I. Polskaya** Prospects of Development for the Information Infrastructure of the Russian Federation Arctic North

Some problems of creation of the information infrastructure for the Russian Federation Arctic North are considered.

The information system of the northern regions is intended to carry out the fully satisfactory information exchange for all the potential users in the interests of both the territories management and for the interactive involvement of the northern territories in the international information space. The employment of the world-wide Internet network seems to be the most promising for the northern regions. The promising information system is seen as the distributed system of co-ordinated databases with single linguistic support based on the well thought-out classification of information resources with centralized control. The user part of the information system is made up in the form of Web-portal supported by the multifunctional search system and wide spectrum of communication service.

**V. A. Koughiya** Geodesy at the Turn of Centuries and Millenniums

The historical review of geodesy development is presented. The progress in the investigation of the Earth shape and size is the main focus of the review.

**B. E. Ivanov** The Influence of Errors in Fairwater Boundary Position on the Navigation Safety Probability

The relationships for evaluation of the navigation safety in the presence of accidental errors in the fairwater boundary positions are elaborated. The possibility of composition of the accidental error for fixing the vessel's position, accidental and systematic errors in the fairwater boundary positions when determining the navigation safety is proved.

**N. I. Ledenyov** On the New Possibility of Adjusting the Submarine Speed Sensors

The new method of determining the true speed of a submerged submarine, based on the employment of the bottom sonar beacons, is considered. The requirements to the accuracy of measurement procedures in implementation of the method are analysed.

**A. L. Golubeva, T. V. Sazonova** Provision of 3D Terrain Presentation on Board the Aircraft

The article deals with provision of 3D terrain presentation, taking the capabilities of airborne computers into account. The algorithms are considered; examples of their application for specific airborne computers are given. Based on research, new methods of providing 3D presentation are suggested; requirements to hardware and cartographic support for the airborne computer are formulated.

**M. B. Solodovnichenko, Y. M. Ustinov, A. R. Shigabutdinov** Technical Features of General-Purpose Automatic Information (Identification) System (AIS)

The structural scheme of AIS, its modes of operation, the signal formats, kinds of formalized messages, organization of the time channels selection, service zones are considered.

**Y. S. Doubinko** Halt of Search and Lock-on of Navigation Satellites Signals for Tracking in the Matched-Filter Receiver by the Wald Criterion

According to the principle of forming the mutually correlated function, all existing satellite navigation receivers are the correlation receivers for which the long cycle of search for the selected satellite signal (20 s) is characteristic. The receivers in the form of the matched filter that have become implementable as soon as very fast-acting signal processors have come into practice, enable this cycle to be reduced to 1 ms, which will allow to enhance considerably the jam resistance of this mode due to the effect of accumulation of the correct detection probability in a given time. The dual-level detection procedure by the Wald criterion provides the additional enhancement of the jam resistance of search (due to the reduction of the average number of the cycles). Theoretical estimates of enhancement of the search characteristic in the SNS user equipment are given.

**G. A. Semyonov, A. I. Kabirov, S. B. Pisarev** Algorithm for Assessment of Abnormal Variations of Signal Phases of VLF Radionavigation Reference Stations in the Periods of Ionospheric Disturbances

The relationships for the variations of the effective height of the "Earth-ionosphere" waveguide in the periods of large-scale ionospheric disturbances (LID) by which the abnormal variations of the signal phases in the very low frequency band are assessed, are presented. Using the developed program enabling the parts of paths influenced by LID to be selected for any point of space for the given date and time for the average statistical evaluation of the flux density for the X-ray energies, proton flux density and magnetic activity index, the phase anomalies on the paths of the «ALFA-M» and «OMEGA» phase radionavigation systems have been evaluated. Recommendations for the choice of the radiopaths for fixing the position have been made.



---

**Y. I. Nikitenko** Principles of Determining the Vessel's Centre of Mass by the SRNS Signals

The principles of elaborating the algorithms for prompt and efficient determining the current position of the centre of mass on board the vessel by means of the Satellite Rdonavigation System equipment to be modernized, are discussed.

**Y. I. Nikitenko, N. A. Ivanov** Variants of Algorithms for Determining the Vessel's Rotation Axis and Centre of Mass by SRNS Signals

Methods of elementary geometry enabled to find a simple algorithm of determining the vessel's rotation axis and the centre of mass, using the measured coordinates of three points of the movement trajectory for the receiving antenna.

Peculiarities of creating such algorithms and directions for their studies to be used in processing all the trajectory points by the least squares method are discussed.

**G. A. Kaloshin, A. N. Maltsev** New Light Sources for Visual Aids to Navigation

The modern light sources (LS), i.e. light emitting diodes, laser diodes, diode-pumped solid-state lasers and electron-pumped semiconductor lasers, are considered. Requirements to visual aids to navigation are substantiated; the factors influencing the employment of LS in these aids are considered.. In connection with the possibility of broad application of modern LS in visual aids to navigation, such characteristics as their spectral content, output power, divergence of radiation, stability of operation, operating life, and other performance parameters are considered.

The possible ways to improve and enhance the visual aids to navigation parameters, using the LS are analysed. The conclusion about the good prospects of employment of modern LS in visual aids to navigation is drawn.

**P. I. Maleyev, A. P. Naumov, V. I. Sheremet** Natural Magnetic Signals of the Sea Shelf Seismic Sources and Specific Features of Their Reception

Magnetic infralow frequency signals of natural origin are studied. Specific features of their separation from the total signals of the Earth's magnetic field variations are pointed out.

**P. I. Maleyev, B. M. Smirnov, I. S. Khasiyev, V. I. Sheremet** On the Problem of Determination of the Geomagnetic Field Induction from a Moving Ferromagnetic Object

In development of the method of determining the magnetic field of a moveable object that had been described earlier, the variant of solution requiring only three, instead of ten, synchronous measurements of the magnetic induction vectors projections and angular positions of an object, is considered.

**V. A. Blednov** On Measurement of the Earth's Magnetic Field Force Components from Moving Ferromagnetic Carriers

The method of determining the Earth's magnetic field components from the moving ferromagnetic carriers that provides the operability of the shipborne or airborne magnetometric converters under the conditions of the magnetic interference is considered. The principle of solving the problem, using the simplified scheme as an example, is considered.

**S. M. Usenkov** Bottom Sediments and Lithodynamics of the Upper Part of Shelf in the North-East of Sakhalin

Based on the results of multiyear complex field studies, the specific features of morphology, lithology and lithodynamics in the coastal zone of the north-east part of Sakhalin Island are considered. The following main types of sediments were distinguished: the medium grained sand, the fine sand and differently grained sand with pebble and gravel. The former two are recent sediments and the latter is relict. The sediments movement borders and deformation of slope are determined. The character of the bottom relief changes depending on the hydrodynamic regime is revealed.

**A. I. Duvanin** Oceanic Tidal Lunar-Solar Time

By the analogy with the time scale of the solar year, the scale of the suggested oceanic tidal lunar-solar time system is substantiated. Simple relationship for conversion of the dates in the solar time into the tidal year marks is elaborated. In this way the link between the continental (solar) time and oceanic (tidal) time is provided.

**Y. N. Zhukov** Artifacts of Cyclic Clock Systems

The use of cyclic clocks results in two artifacts in the observed process: periodicity – nonperiodicity and degree of chaoticity.

**Y. N. Zhukov, E. V. Fedorova** Analytical Principles of Calculating the Tidal Charts Based on the Theory of Complex Variable Functions

The formalized method of compiling the tidal charts that allows the computer-aided calculation of these charts to be carried out, using the set values of the harmonic constants along the contour of the water area, is suggested.

**I. L. Bashmatchnikov, N. E. Ivanov, V. A. Rozhkov** Methods of Analysis of Tidal Movements in the Seas

In the Federal target-oriented program «Development of the unified system covering the state of the World ocean» (ESIMO) in 1999-2007 designed to support the maritime activities, it is envisaged to carry out the projects including the development of the information database on the World ocean tides, regional guides on tides and tidal currents, as well as the software and hardware for processing and operational access to specialized information. Several methods are currently used to obtain the tidal characteristics, i.e. various modifications of harmonic analysis, spectral analysis and the methods based on the theory of polyperiodically correlated stochastic processes. In the present paper the comparison of the methods is made and examples of evaluation of the tidal characteristics, using the in-situ data of the sea level variations and current velocities, including those caused by the internal waves of tidal origin, are given.

**S. I. Mastryukov, A. Y. Ustimenko** Analysis of Currents in the Southern Area of the Barents' Sea

The results of analysis and processing the observed data on the currents in the area of the SSN KURSK disaster are presented; the main causes of errors in the measurements carried out are stated. The preliminary evaluations of characteristics both for the tidal and nonperiodic currents are made; the algorithm of calcu-

lation of the harmonic constants for the currents is given and the results of calculations of the tidal currents are presented. The ways to determine more exactly the harmonic constants are suggested. The areas where the results of the calculations can be used are pointed out.

**P. G. Brodsky, B. E. Ivanov, A. P. Vasilyev** Training the Highly-Qualified Scientists in the Field of Military Navigation, Hydrography, Geophysics, and Hydrometeorology

The organization of training the Doctors and Candidates of Science at the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF, and the history of establishment and work of the country's first Doctor Dissertation Council in the field of military navigation, hydrography, geophysics, and hydrometeorology are described.



## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**АЛЕКСЕЕВ Сергей Петрович**, начальник ГНИНГИ, заслуженный военный специалист РФ, председатель СПб регионального отделения Российского общественного института навигации, действительный член Академии транспорта РФ, контр-адмирал, д.т.н. Окончил ВВМУ им. М. В. Фрунзе (1972) и ВМА им. Н.Г. Кузнецова (1983). Специализация - штурман. Автор более 90 печатных трудов.

**БАШМАЧНИКОВ Игорь Львович**, старший преподаватель кафедры океанологии Санкт-Петербургского государственного университета, канд. геогр. н. Окончил географический факультет Санкт-Петербургского государственного университета в 1993 г. Специализация – приливные процессы в океанах. Автор 14 печатных трудов.

**БЛЕДНОВ Вадим Алексеевич**, зав. Сектором морской магнитометрии Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, старший научный сотрудник, докт. физ.-мат. н. Окончил Ленинградский электро-технический институт в 1960 г. Специализация - радиотехника, гироскопические приборы и устройства. Автор около 110 печатных трудов.

**БРОДСКИЙ Павел Григорьевич**, главный научный сотрудник ГНИНГИ, капитан 1 ранга, докт. воен.н. Окончил Каспийское ВВМУ (1974), ВМА им. Н.Г. Кузнецова (1986). Специализация: штурман. Автор около 90 печатных трудов.

**ВАСИЛЬЕВ Александр Петрович**, начальник отдела ГНИНГИ, полковник, канд. техн. н. Окончил Ленинградский государственный университет в 1979 г. Специализация - морская геофизика. Автор более 30 печатных трудов.

**ГОЛУБЕВА Анастасия Леонидовна**, математик федерального научно-производственного центра «Раменское проектно-конструкторское бюро». Окончила Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана в 1994 г. Специализация – бортовые навигационные комплексы летательных аппаратов. Имеет 1 патент на изобретение, автор 1 опубликованной работы.

**ALEKSEYEV Sergey P.**, Chief of GNINGI, 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 (1972) and Naval Academy (1983). Speciality: navigation. Author of more than 90 publications.

**BASHMATCHNIKOV Igor L.**, CandSc, Assistant Professor, Department of Oceanography, St. Petersburg State University. Graduated from St. Petersburg State University (1993). Speciality: tidal processes in the ocean. Author of 14 publications.

**BLEDNOV Vadim A.**, head of the marine magnetometry sector, St. Petersburg Branch, the Institute of the Earth's Magnetism, Ionosphere and Radio Waves Propagation, senior researcher, DSc. Graduated from Ulyanov-Lenin Leningrad Electrotechnical Institute (1960). Speciality: radio engineering, gyroscopic devices. Author of more than 107 publications.

**BRODSKY Pavel G.**, chief researcher of GNINGI, Captain 1-st rank, DSc. Graduated from Caspian Naval College (1974) and Naval Academy (1986). Speciality: navigation. Author of about 90 publications.

**VASILYEV Aleksandr P.**, chief of department, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, Colonel, CandSc. Graduated from Leningrad University (1979). Speciality: marine geophysics. Author and co-author of more than 30 publications.

**GOLUBEVA Anastasiya L.**, mathematician, Federal Scientific-Production Centre Ramenskoye Design Company. Graduated from Moscow Bauman State Technical University (1994). Sphere of research: airborne navigation systems of aircraft. Author of one publication; one patent for invention.

**ДМИТРИЕВ Виктор Георгиевич**, ученый секретарь ГНИНГИ, полковник в отставке, канд. техн. н., выпускник ЛГУ (1972). Специализация – математика, военная гидрометеорология, информационные технологии управления. Автор около 50 печатных трудов.

**ДОБРОТВОРСКИЙ Александр Николаевич**, зам. начальника ГНИНГИ, член-корреспондент Академии Инженерных наук РФ, полковник, докт. техн.н., профессор. Окончил военную инженерно-космическую академию им. А. Ф. Можайского (1973). Специализация: системное проектирование. Автор около 170 печатных трудов.

**ДУБИНКО Юрий Сергеевич**, ведущий специалист КБ "Навис", капитан 1 ранга (в отставке), канд. техн. н., доцент. Окончил Высшее военноморское училище им. М. В. Фрунзе (1958) и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова (1966). Специализация: спутниковая радионавигация. Автор более 50 печатных трудов, в том числе двух монографий

**ДУВАНИН Александр Иванович**, профессор Московского государственного университета, докт. геогр. н. Окончил Ленинградский государственный университет в 1939 г. Специалист в области изучения приливов. Автор более 50 печатных трудов, в том числе 1 монографии.

**ЖУКОВ Юрий Николаевич**, ведущий научный сотрудник ГНИНГИ, канд. техн. н. Окончил Ленинградский гидрометеорологический институт в 1972 г. Специализация - гидрометеорология. Автор более 10 печатных трудов.

**ИВАНОВ Борис Евгеньевич**, главный научный сотрудник ГНИНГИ, 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 ВВМУ в 1957 г. и ВМА им. Н.Г. Кузнецова в 1969 г. Специализация - морская геодезия, гравиметрия, гидрография, навигация. Автор около 200 печатных трудов.

**ИВАНОВ Николай Александрович**, доцент Государственной морской академии им. адм. С. О. Макарова. Окончил Ленинградское высшее инженерно-морское училище в 1967 г. Специализация - радионавигационные системы. Автор 15 печатных трудов.

**ИВАНОВ Николай Евгеньевич**, научный сотрудник СПО Государственный океанографический институт. Окончил океанологический факультет Ленинградского гидрометеорологического института в 1980 г. Специализация – океанология. Автор 18 печатных работ.

**DMITRIYEV Victor G.**, scientific secretary of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF, Colonel (Ret.), CandSc, Graduated from Leningrad State University (1972). Speciality: mathematics, military hydrometeorology, management of information technologies. Author of about 50 publications.

**DOBROTVORSKY Alexandr N.**, Deputy Chief of GNINGI. Colonel, DSc, professor, Corresponding Member of the Academy of Engineering Sciences RF. Graduated from Mozhaisky Military Space Academy (1973). Speciality: system design. Author of about 170 publications.

**DOUBINKO Yuri S.**, leading specialist of "Navis" Design Bureau, Captain 1-st rank (Ret.), CandSc, senior researcher. Graduated from Frunze Naval College (1958) and Naval Academy (1966). Speciality: satellite radionavigation. Author of more than 50 publications, including two monographs.

**DOUVANIN Aleksandr I.**, DSc, professor, Moscow State University. Graduated from Leningrad State University (1939). Speciality: tides. Author of more than 50 publications, including one monograph.

**ZHUKOV Yuri N.**, leading researcher of GNINGI, CandSc. Graduated from Leningrad Hydrometeorological Institute (1972). Speciality: hydrometeorology. Author of more than 10 publications.

**IVANOV Boris E.**, senior researcher of GNINGI, Captain 1-st rank (Ret.), DSc, professor, RF State Prize Winner, Honoured Scientist, chairman of Krylov STO section. Graduated from Baltic Naval College (1957) and Naval Academy (1969). Speciality: marine geodesy, gravimetry, hydrography, navigation. Author of about 200 publications.

**IVANOV Nikolay A.**, Senior Reader of Markarov State Maritime Academy. Graduated from Leningrad Higher Engineering Marine College (1967). Speciality: radionavigation systems. Author of 15 publications.

**IVANOV Nikolay E.**, researcher of State Oceanographic Institute, St. Petersburg Branch. Graduated from Leningrad Hydrometeorological Institute (1980). Speciality: oceanology. Author of 18 publications.

**КАБИРОВ Андрей Ильгизарович**, зам. директора ФГУП «Российский институт радионавигации и времени» (РИРВ). Окончил Ленинградский институт связи в 1988 г. Специализация - радионавигационные системы и радиопередающие устройства. Автор около 10 печатных трудов.

**КАЛОШИН Геннадий Александрович**, ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы СО РАН, канд. физ.-мат. н. Специализация - оптика атмосферы и оптико-электронные системы. Автор более 70 научных трудов, ряда патентов.

**КОМАРИЦЫН Анатолий Александрович**. Начальник Государственного управления навигации и океанографии МО РФ, адмирал, докт. техн. наук. Окончил Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С. О. Макарова в 1969 г., Военно-морскую академию в 1981 г., Академию генерального штаба в 1986. Специализация – штурман. Автор более 90 печатных трудов.

**КОУГИЯ Вилио Александрович**, зав. кафедрой Петербургского государственного университета путей сообщения, докт. техн. н., профессор, капитан 3 ранга (в отставке). Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе в 1950 г. Специализация - гидрография. Автор более 120 печатных трудов.

**ЛЕДЕНЕВ Николай Иванович**, заместитель начальника управления навигации ГНИНГИ. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе в 1977 г. и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова в 1991 г. Специализация - штурман, специалист по техническим средствам навигации. Автор более 20 печатных трудов.

**МАЛЕЕВ Павел Иванович**, старший научный сотрудник ГНИНГИ, капитан 1 ранга (в отставке), канд. физ.-техн. н. Окончил Ленинградский государственный университет в 1952 г. Специализация – технические средства навигации. Автор более 170 печатных трудов.

**МАЛЬЦЕВ Анатолий Николаевич**, ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы СО РАН, к. физ.-мат. н. Специализация - лазеры. Автор более 70 печатных работ.

**МАСТРЮКОВ Сергей Иванович**, начальник отдела ГНИНГИ, полковник, канд. техн. н. Окончил Ленинградский гидromетеорологический институт в 1978 г. Специализация - океанология. Автор более 10 печатных трудов.

**НАУМОВ Анатолий Петрович**, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева, канд. техн. н. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1965 г. Специализация – радиофизика. Автор более 70 печатных трудов.

**KABIROV Andrey I.**, deputy director of Federal State Unitary Enterprise "Russian Institute of Radionavigation and Time". Graduated from Leningrad Institute of Communications (1988). Speciality: radionavigation systems and radiotransmitters. Author of about 10 publications.

**KALOSHIN Gennady A.**, leading researcher, CandSc, Institute of Atmospheric Optics SB RAS. Speciality: atmospheric optics and optical-electronic devices. Author of more than 70 publications and a number of patents.

**KOMARITSYN Anatoly A.**, Chief of the Head Department of Navigation and Oceanography (MoD RF), Admiral, DSc. Graduated from Makarov Pacific Naval College (1969), The Naval Academy (1981), General Staff Academy (1986). Speciality: navigation. Author of more than 90 publications.

**KOUGHIIYA Vilio A.**, head of department, Petersburg Railway Transport State University, DSc, professor, Captain 3<sup>rd</sup> rank (Ret.). Graduated from Frunze Naval College (1950). Speciality: hydrography. Author of more than 120 publications.

**LEDENYOV Nikolai I.**, deputy chief of the Navigation department, the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF. Graduated from Frunze Naval College (1977) and the Naval Academy (1991). Speciality: navigator, specialist in technical aids to navigation. Author of more than 20 publications.

**MALEYEV Pavel I.**, senior researcher of the State Research Navigation-Hydrographic Institute, MoD RF, CandSc, Captain 1<sup>st</sup> rank (Ret.). Graduated from Leningrad State University (1952). Speciality: technical means of navigation. Author of more than 170 publications.

**MALTSEV Anatoly N.**, leading researcher, CandSc, Institute of Atmospheric Optics SB RAS. Speciality: lasers. Author of more than 70 publications.

**MASTRYUKOV Sergei I.**, chief of division of GNINGI, Colonel, CandSc. Graduated from St. Petersburg Hydrometeorological Institute (1978). Speciality: oceanology. Author of more than 10 publications.

**NAUMOV Anatoly P.**, senior researcher, Mendeleev All-Union Research Institute of Metrology, CandSc. Graduated from Leningrad Pedagogical Institute (1965). Speciality: radiophysics. Author of more than 70 publications.

**НИКИТЕНКО Юрий Иванович**, профессор ГМА им. адм. С. О. Макарова, докт. техн. н. Окончил Ленинградское высшее инженерное морское училище в 1949 г. Специализация – радионавигационные системы. Автор около 150 печатных трудов.

**ПИСАРЕВ Сергей Борисович**, директор ФГУП «Российский институт радионавигации и времени», канд. техн. н. Окончил Ленинградский институт точной механики и оптики. Специализация – радионавигационные системы и радиопередающие устройства. Автор 60 печатных трудов.

**ПОЛЬСКАЯ Мария Ивановна**, президент некоммерческого объединения «Северный фонд», первый заместитель Постоянного представителя республики Саха, канд. филол. н. Окончила Якутский университет в 1972 г. Специализация - информационные технологии, семиотика. Автор 15 печатных трудов.

**РОЖКОВ Валентин Алексеевич**, директор СПО Государственный океанографический институт, докт. физ.-мат. н., профессор, заслуженный деятель науки. Окончил географический факультет Ленинградского государственного университета в 1959 г. и математико-механический факультет Ленинградского государственного университета в 1965 г. Специализация – теория вероятности и математическая статистика. Автор 240 печатных работ.

**САЗОНОВА Татьяна Владимировна**, ведущий математик федерального научно-производственного центра «Раменское проектно-конструкторское бюро», канд. техн. н. Окончила Уральский политехнический институт в 1980 г. Специализация - бортовые навигационные комплексы летательных аппаратов. Имеет 21 патент на изобретение, автор 20 печатных трудов.

**СЕМЕНОВ Георгий Алексеевич**, главный специалист ФГУП «Российский институт радионавигации и времени», канд. техн. н. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1960 г. Специализация – радиолокация и радионавигация. Автор 150 печатных трудов и одной монографии.

**СМИРНОВ Борис Михайлович**, старший научный сотрудник АОЗТ «Криомаг», канд. техн. н. Окончил Московский электротехнический институт в 1967 г. Специализация – электромагнитные измерения. Автор около 60 печатных трудов.

**NIKITENKO Yuri I.**, professor of Makarov State Maritime Academy, DSc. Graduated from Leningrad Higher Engineering Marine College (1949). Speciality: radionavigation. Author of about 150 publications.

**PISARYEV Sergey B.**, director of Federal State Unitary Enterprise "Russian Institute of Radionavigation and Time", CandSc. Graduated from Leningrad Institute of Fine Mechanics and Optics. Speciality: radionavigation systems and radiotransmitters. Author of about 60 publications.

**POLSKAYA Maria I.**, President of Non-commercial Union "Severny Fond", First Deputy Permanent Representative of the Republic of Sakha, CandSc (philology). Graduated from Yakutsk University (1972). Speciality: information technology, semiotics. Author of about 15 publications.

**ROZHKOV Valentin A.**, DSc, professor, Director of State Oceanographic Institute. Graduated from Leningrad State University (faculty of geography, 1959; faculty of mathematics, 1965). Speciality: theory of probabilities and mathematical statistics. Author of 240 publications.

**SAZONOVA Tatiana V.**, leading mathematician, Federal Scientific-Production Centre Ramenskoye Design Company, CandSc. Graduated from Ural Polytechnical Institute (1980). Sphere of research: airborne navigation systems of aircraft. Author of 20 publications; 21 patents for invention.

**SEMYONOV Georgy A.**, senior specialist of Federal State Unitary Enterprise "Russian Institute of Radionavigation and Time", CandSc. Graduated from Leningrad Polytechnical Institute (1960). Speciality: radiolocation and radionavigation. Author of about 150 publications including one monograph.

**SMIRNOV Boris M.**, senior researcher, Joint Stock Company "Cryomag", CandSc. Graduated from Moscow Electrotechnical Institute (1967). Speciality: electromagnetic measurements. Author of about 60 publications.

**СОЛОДОВНИЧЕНКО Михаил Борисович**, начальник кафедры радиоэлектроники Государственной морской академии им. адм. С. О. Макарова, профессор, докт. техн. н. Окончил Ленинградское высшее инженерно-морское училище в 1970 г. Специализация – радиоэлектроника, судовые системы радиосвязи и навигации. Автор 90 печатных трудов.

**УСЕНКОВ Святослав Михайлович**, доцент Санкт-Петербургского государственного университета, канд. геол.-минер. н. Окончил Ленинградский государственный университет в 1975 г. Специализация – морская геология, седиментология береговой зоны, геоэкология. Автор 80 печатных трудов, в том числе 3 монографий.

**УСТИМЕНКО Алексей Юрьевич**, начальник лаборатории ГНИНГИ, капитан-лейтенант. Окончил Севастопольский государственный технический университет в 1996. Специализация - инженер-системотехник. Автор 10 печатных трудов.

**УСТИНОВ Юрий Матвеевич**, профессор кафедры радионавигационных приборов и связи Государственной морской академии им. адм. С. О. Макарова, докт. техн. н. Окончил Ленинградское высшее инженерно-морское училище в 1953 г. Специализация – радионавигация и связь. Автор более 120 печатных трудов, в том числе 4 монографий.

**ФЕДОРОВА Елена Владимировна**, ведущий инженер Государственного океанографического института (Москва). Окончила Московский государственный университет в 1978 г. Специалист в области изучения приливов и морской геоморфологии. Автор более 30 печатных трудов.

**ХАСИЕВ Игорь Савельевич**, ведущий инженер АОЗТ «Криомаг». Окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения в 1974 г. Специализируется в области магнитных измерений. Автор более 20 печатных трудов.

**ШЕРЕМЕТ Виктор Иванович**, руководитель лаборатории измерения магнитных полей во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева. Окончил Харьковский государственный университет в 1960 г. Специализация – магнитные измерения, сверхпроводимость, криогенная техника. Автор более 90 печатных трудов в том числе 2 монографий.

**SOLODOVNICHENKO Mikhail B.**, head of radioelectronics department, Makarov State Maritime Academy (St. Petersburg), DSc, professor. Graduated from Leningrad Higher Marine Engineering College (1970). Sphere of scientific interests: radioelectronics, ship systems of radiocommunication and navigation. Author of 90 publications.

**USENKOV Svyatoslav M.**, CandSc, Senior Reader of Geological faculty, St. Petersburg State University. Graduated from St. Petersburg State University (1975). Sphere of scientific interests: marine geology, coastal zone sedimentology, environmental geology. Author of 80 publications, including three monographs.

**USTIMENKO Aleksei Y.**, 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 10 scientific reports.

**USTINOV Yuri M.**, professor of the department for radionavigation devices and communications, Makarov State Maritime Academy (St. Petersburg), DSc. Graduated from Leningrad Higher Marine Engineering College (1953). Sphere of scientific interests: radionavigation, communications. Author of 120 publications, four monographs.

**FEDOROVA Elena V.**, leading engineer, Moscow State Institute of Oceanography. Graduated from Moscow State University (1978). Speciality: tides; coastal geomorphology. Author of about 30 publications.

**KHASIYEV Igor S.**, leading engineer of Joint Stock Company "Cryomag". Graduated from Leningrad Institute of the Aviation Devices Building (1974). Speciality: magnetic measurements. Author of more than 20 publications.

**SHEREMET Victor I.**, head of the laboratory for magnetic fields measurements, Mendeleev All-Union Research Institute of Metrology. Graduated from Kharkov State University (1960). Speciality: magnetic measurements, superconductivity, cryogenic technology. Author of more than 90 publications, including two monographs.



**ШИГАБУТДИНОВ Альберт Рафаилович**, старший научный сотрудник лаборатории морских навигационных систем Центрального научно-исследовательского института морского флота. Окончил Ленинградский электротехнический институт в 1984 г. Специализация – спутниковые радионавигационные и связные системы. Автор 25 печатных трудов.

**SHIGABUTDINOV Albert R.**, senior researcher of laboratory for the maritime information satellite systems, Central Research Institute of the Marine, St. Petersburg. Graduated from Leningrad Ulyanov-Lenin Electrotechnical Institute (1984). Sphere of scientific interests: satellite radio-navigation and communication systems. Author of 25 publications.



## ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА

### Информация о правилах оформления подписки на издания Государственного научно-исследовательского навигационно- гидрографического института Министерства обороны Российской Федерации (ГНИНГИ МО РФ)

Юридические и физические лица могут приобрести журнал "Навигация и гидрография", материалы конференций, информационные материалы, разработанные отделом ВНИ МО РФ (аналитические и реферативные обзоры, переводы), оформив подписку как за безналичный, так и наличный расчет. Время оформления подписки не ограничено.

Журнал "Навигация и гидрография" выходит 2 раза в год. В 2002 г. выйдут 14 и 15 номера. Заказ можно оформить на любой номер журнала, начиная с 12. НДС на все печатные издания не начисляется. Цена одного номера журнала – **150** руб.

Ежеквартально отделом ВНИ ГНИНГИ МО РФ выпускаются:

- Реферативно-библиографический указатель. Стоимость одного выпуска - **60** руб.
- Реферативные обзоры. Стоимость одного выпуска - **60** руб.
- Сборники переводов. Стоимость одного выпуска - **60** руб.

Можно приобрести также сборник докладов Четвертой Российской научно-технической конференции "Современное состояние, проблемы навигации и океанографии" (НО-2001) Стоимость 2-х томов Сборника – **350** рублей.

Главному редактору журнала «Навигация и гидрография»  
**Алексееву С. П.**  
199106, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41

### БЛАНК-ЗАКАЗ

Прошу оформить подписку (заказ) на:

- \_\_\_ экз. журнала «Навигация и гидрография», №№ .....;
- \_\_\_ экз. реферативно-библиографического указателя, №№ .....;
- \_\_\_ экз. реферативного обзора, №№ .....;
- \_\_\_ экз. сборника переводов, №№ .....;
- \_\_\_ экз. сборника докладов конференции (НО-2001).

Стоимость подписки в сумме \_\_\_\_\_

перечислена на расчетный счет ГНИНГИ МО РФ:

ИНН 7801020940

р/сч 40502810100000000107; (кор/сч - нет)

БИК 044081002; ОКОНХ 95120; ОКПО 08303504

ПУ ЦБ РФ Флагманское г. С. -Петербург.

Платежное поручение № \_\_\_\_\_ от " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 200\_ г.

Заказ направить по адресу:

индекс п/о \_\_\_\_\_, область (край, респ.) \_\_\_\_\_

город, улица, дом \_\_\_\_\_

Кому \_\_\_\_\_

(полное название организации и ФИО контактного лица или ФИО заказчика)

В платежном поручении указать: **«Подписная плата за журнал(ы) ...»**.

Заполненный бланк-заказ перешлите в редакцию по указанному адресу:

## **ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ**

В журнале публикуются результаты исследований в области навигации, гидрографии, океанографии, гидрометеорологии, морской картографии, морской геофизики и экологии. Издание нацелено на освещение концептуальных научных положений, оперативную публикацию новейших теоретических исследований, описание передовых технических достижений, на отражение материалов симпозиумов и конференций и хроники важнейших событий научной жизни.

### **Требования к оформлению**

1. Статьи принимаются на дискетах 3,5" в формате текстового редактора **MS Word for Windows** (версия не ранее 1997 г.) с приложением текста в традиционном «бумажном» варианте (размер шрифта 14 пунктов, межстрочный интервал 1,5). Все материалы должны быть окончательно проверены и подписаны авторами.
2. Объем статьи не должен превышать 0,5 авторского листа (20 000 печатных знаков), включая рисунки, таблицы и список литературы.
3. Название статьи должно в наиболее краткой форме отражать ее содержание.
4. В статье указывается индекс ГРНТИ. К работе прилагается аннотация (объемом не более 150 слов) и сведения об авторах (ФИО полностью; полное название учреждения, где работает автор; должность; ученая степень; воинское звание; год окончания и полное название высшего учебного заведения, которое закончил автор; специализация, количество опубликованных научных трудов). Аннотация и сведения об авторах оформляются отдельными файлами. Следует указать также почтовый и электронный адреса авторов, а также служебные и домашние номера телефонов. К рукописи прилагается сопроводительное письмо организации, где выполнено данное исследование, и акт экспертизы о возможности открытого опубликования.
5. Используемые в статье величины и единицы измерения должны соответствовать стандартным обозначениям согласно Международной системе единиц СИ.
6. Рисунки представляются в черно-белом изображении в форматах **.jpg** или **.gif** с разрешением до **300 DPI**. Все рисунки должны быть размером не более 210x140 мм и иметь порядковые номера и подписи.
7. Таблицы должны иметь порядковые номера и названия. Длина строки таблиц при шрифте "Arial" размером 9 пунктов не должна превышать 200 мм. При этом таблицы, у которых длина строки при указанном шрифте превышает 145 мм, должны иметь вертикальную ориентацию.
8. Список использованной литературы составляется на языке оригинала (исключение – языки с иероглифическим написанием слов) в порядке ссылок на источники по тексту. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, где указывается номер работы по списку. В списке литературы указываются: фамилии и инициалы авторов, полное название книги или статьи, название сборника, город, издательство, год, том, номер, страницы.
9. Материалы, отправляемые по E-mail, следует направлять в виде присоединенных к письму файлов. Размер одного сообщения не должен превышать 0,5 Mb. Письма большего объема необходимо компрессировать архиватором **ZIP** или разделять. Графические файлы не должны содержать более одного рисунка.

**Адрес редакции: Россия, 199106, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41.**

**Телефон: (812) 322-18-88, 322-34-18 (доб. 215, 249),**

**Факс: (812) 322-33-19 (в рабочее время).**

**E-mail: gningi@navy.ru**

# НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ, 2001, №13

Редактор: И. Ю. Бугрова

Компьютерное оформление: М. В. Данилова

Подписано в печать 29.01.2002 г.

Заказ № 25

Рег. № 013267 от 26.01.95 г.

Комитет РФ по печати

---

© Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт  
Министерства обороны РФ