

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

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

ИЗДАЕТСЯ С 1995 ГОДА

**28
2009**

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербург

Главный редактор
д. т. н., проф. С. П. Алексеев

Редакционная коллегия:

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

© Открытое акционерное общество
«Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт»
2009

**THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC
INSTITUTE**

NAVIGATION AND HYDROGRAPHY

PUBLISHED SINCE 1995

**28
2009**

RUSSIAN FEDERATION MINISTRY OF DEFENCE

Saint-Petersburg

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

Editorial board

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

© **Open Joint Stock Company**
«**The State Research Navigation-Hydrographic Institute**»
2009

СО Д Е Р Ж А Н И Е

С. П. Алексеев.

Технологические инновации как основа современной технической политики в области навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности.....9

НАВИГАЦИЯ

А. В. Лаврентьев, М. Л. Богданович, В. Н. Костин, С. Б. Курсин.

Определение поправки высот светил, измеренных оптической астронавигационной системой с заданной точностью 14

А. В. Лаврентьев, М. Л. Богданович, В. Н. Костин, С. Б. Курсин.

Определение с заданной точностью и надежностью поправок азимута, измеренного оптической астронавигационной системой 21

М. Л. Богданович, Е. П. Гладских, Ю. А. Глухов, В. А. Максимов.

Решение навигационной задачи по данным измерения радиальных дальностей объекта относительно среднеорбитных навигационных спутников..... 30

Н. М. Груздев.

Сравнительная оценка способов расчета безопасной ширины полосы движения 36

В. С. Болдырев, В. Я. Васильев, А. Н. Яковлев.

Об организации навигационно-гидрографического обеспечения мореплавания..... 41

А. Д. Голяков.

Общий подход к обеспечению функциональной безопасности. основные положения..... 48

А. Д. Голяков, С. Я. Старков.

Методика аддитивной оценки доли отказов по общим причинам при определении показателей безотказности систем навигационно-гидрографического обеспечения мореплавания..... 54

Г. Б. Вольфсон, П. И. Малеев.

О перспективности использования гравиградиентметрической аппаратуры с целью оперативного прогноза опасности от землетрясений для морских участков трубопроводов..... 62

Г. Б. Вольфсон, П. И. Малеев.

Физико-технические предпосылки создания гравиградиентметрического сейсмоприемника для оперативного прогноза землетрясений..... 72

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

О. А. Гасников, В. В. Удалов, В. А. Филин.

Сущность метода вероятностного описания условий рефракции звука в районах океана 83

Э. А. Белоусова, Ю. Н. Жуков, Ю. П. Коровяковский.
Технология трехмерной визуализации геопространственных объектов
и полей.....93

Э. С. Зубченко.
Современные методы обработки данных съемки рельефа дна.....100

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ОКЕАНОГРАФИЯ

С. И. Мастрюков.
Блуждающие волны и безопасность мореплавания.....116

С. И. Мастрюков.
Гидрометеорологическое обеспечение безопасности общего
мореплавания.....124

Ю. Н. Жуков.
О возможности отождествления вероятности индивидуального
события и его повторяемости в практике гидрометеорологии.....135

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ139

C O N T E N T S

S. P. Alekseyev.

Technological innovations as a basis of the current technical policy in the sphere of the navigation-hydrographic support for the maritime activities9

NAVIGATION

A.V. Lavrentyev, M. L. Bogdanovich, V. N. Kostin, S. B. Kursin.

Finding the correction for the celestial altitudes measures by the optical astronavigation system with a set accuracy 14

A.V. Lavrentyev, M. L. Bogdanovich, V. N. Kostin, S. B. Kursin.

Determination with a set accuracy and reliability of corrections for the azimuth measured by the optical astronavigation system21

M. L. Bogdanovich, E. P. Gladskikh, Yu. A. Glukhov, V. A. Maksimov.

The floating warning beacon with inertia-piston wave-action powerplant30

N. M. Gruzdev.

Comparative estimate of calculation methods for the safe traffic lane width36

V. S. Boldyrev, V. Ya. Vasilyev, A. N. Yakovlev.

On organization of the navigation-hydrographic support for seafaring41

A. D. Golyakov.

General approach to provision of functional safety48

A. D. Golyakov, S. Ya. Starkov

Technique of the additive estimation of a share of refusals due to general causes when defining the reliability parameters of navigation-hydrographic support systems for seafaring.....54

G. B. Wolfson, P. I. Maleyev

On the prospects of using the gravigradientometric equipment for the sea sections of pipelines in order to provide the operative forecasts of the earthquake threats62

G. B. Wolfson P. I. Maleyev

Physical-Technical Bases for Creating the Gravigradientometric Receiver for Operational Earthquake Forecasts.....72

HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY

O. A. Gasnikov, V. V. Udalov, V. A. Filin.

The essence of the method of probabilistic description of the sound refraction conditions in various areas of the ocean83

E. A. Belousova, Y. N. Zhukov, V. P. Korovyakovsky.

Technology of 3D Visualization of Geospatial Objects and Fields93

E. S. Zubchenko.

Modern methods of processing the bottom relief survey data 100

HYDROMETEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY

S. I. Mastryukov.

Wave-Killers as a Real Treat to Navigation Safety116

S. I. Mastryukov.

Climatic Support for the Safety of General Navigation124

Yu. N. Zhukov.

On the possibility to identify the probability of an individual event and its
repeatability in the practice of hydrometeorology135

INFORMATION ABOUT AUTHORS139

ГРНТИ 78.25.31

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ КАК ОСНОВА СОВРЕМЕННОЙ
ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ В ОБЛАСТИ НАВИГАЦИОННО-
ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

С. П. АЛЕКСЕЕВ
(ОАО «ГНИНГИ»)

Технологические инновации рассматриваются в качестве основы современной технической политики в области навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности. Обсуждаются возможности использования новых физических явлений, эффектов и принципов, пригодных для создания средств навигации и гидрографии.

«В течение ближайших десятилетий Россия должна стать страной, благополучие которой обеспечивается не столько сырьевыми, сколько интеллектуальными ресурсами, «умной» экономикой, создающей уникальные знания, экспортом новейших технологий и продуктов инновационной деятельности».

Д. А. Медведев «Россия, вперед»

Важное место в процессе достижения стратегических приоритетов и решении задач национальной морской политики занимает навигационно-гидрографическое обеспечение (НГО) морской деятельности.

Обобщение положений основных документов, определяющих основы политики РФ в области военно-морской деятельности, составляющих нормативную правовую основу навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности РФ, показывает [1–3], что:

- НГО морской деятельности относится к сфере ведения Минобороны России и возложено на ВМФ в качестве одной из его основных задач;
- НГО морской деятельности играет ведущую роль в обеспечении безопасности мореплавания как составной части комплекса мер безопасности морской деятельности, связанных с особенностями водной стихии;
- НГО морской деятельности направлено на обеспечение национальной безопасности страны, в первую очередь, ее военной мобилизационной и ресурсной составляющих охраны государственной границы и разграничения морских пространств.

Указанные положения определяют навигационно-гидрографическое обеспечение морской деятельности по своему содержанию как деятельность по изучению, освоению и использованию Мирового океана в интересах создания благоприятной навигационно-гидрографической обстановки для действий субъектов национальной морской политики, доведению до пользователей навигационно-гидрографической информации для ее учета при принятии решений, планировании и ведении морской деятельности [6–7].

С учетом современной оценки состояние НГО морской деятельности Российской Федерации диктует необходимость осуществления согласованного комплекса мероприятий по совершенствованию этой системы.

При этом совершенствование системы НГО должно быть направлено на:

- достижение требуемого уровня безопасности мореплавания во внутренних морских водах, в территориальном море, исключительной экономической зоне, на континентальном шельфе Российской Федерации, а также в заданных океанских районах и морских зонах в соответствии с положениями международных конвенций и соглашений в этой сфере и положений нормативных правовых актов Российской Федерации;
- обеспечение в навигационно-гидрографическом отношении расчетной эффективности применения военного потенциала Российской Федерации при решении целевых задач национальной безопасности в мирный период и в военное время.

В качестве научного инструмента, обеспечивающего совершенствование системы НГО, выступает техническая политика в области НГО обороны и экономики страны.

Техническая политика основывается на научно-техническом прогнозировании путей развития сил и средств на определенный (заданный) период времени [1, 7]. Техническую политику в области НГО обороны и экономики страны в целом следует рассматривать как предметную область, сфера распространения которой охватывает исследования и реализацию результатов решения теоретических, методологических и практических проблем изучения и использования Мирового океана, создания сил и средств системы НГО, методов их использования в интересах повышения эффективности деятельности флота, общего мореплавания, спасения жизни человека на море [8].

Методология обоснования технической политики в области НГО опирается на единые методологические положения и принципы программно-целевого планирования развития морских средств навигации и океанографии (МСН и О), в соответствии с которыми предлагается совместное, согласованное по критериям, методам и срокам проведение работ по обоснованию перспектив их развития. Определяющее место в указанных работах должны занимать исследования возможностей создания перспективных МСН и О на основе использования новых физических явлений, эффектов и принципов, поскольку результаты этих работ составляют основу базисных или улучшающих технологических инноваций в рассматриваемой области.

Это положение вытекает из Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике» [4], где отмечается, что проведение исследований проблем изучения и использования Мирового океана, создания сил и средств системы НГО оборонной и экономической деятельности на море, методов их использования должно быть основано на достижениях науки, фундаментальных и прикладных исследованиях и разработках. Таким образом, поиск путей использования новых физических явлений, эффектов и принципов, пригодных для создания средств навигации и гидрографии и при разработке методов их использования, является определяющим в технической политике в области НГО.

Эффективность такого подхода подтверждается всей отечественной историей развития навигационного приборостроения, которая неразрывно связана с

открытиями и достижениями в науке и технике. Начиная со середины прошлого века за сравнительно небольшой исторический период было открыто и исследовано большое количество новых физических явлений, эффектов и принципов, что обеспечило создание ряда принципиально новых средств навигации (инерциальные навигационные системы, гидроакустические измерители абсолютной скорости, спутниковые навигационные системы и др.), значительно повышающих эффективность использования кораблей и судов.

В последние десятилетия для решения важных государственных задач по обеспечению военного строительства, изучения Мирового океана учеными и специалистами учреждений ВМФ и предприятий промышленности проведены теоретические исследования, фундаментальные работы в области гироскопии, гидроакустики, оптики, вычислительной техники, спутниковой навигации и других областях, результатом которых является [8]:

- разработка и внедрение новых технических средств навигации кораблей и инерциальных комплексов подводных лодок;
- создание карт в квазигеографической системе координат, разработка методических рекомендаций и руководств для плавания в высоких широтах;
- обоснование перспективных путей создания спутниковой навигации, разработка соответствующей приемной аппаратуры;
- съемка геофизических полей отдельных районов Мирового океана;
- разработка методов сбора, систематизации и автоматизированной обработки материалов гидрометеорологических исследований и др.

Указанные достижения определили исторический вклад ученых и специалистов – штурманов и гидрографов – в решение задач национальной морской политики и позволили обеспечить:

- создание ракетно-ядерного флота;
- развертывание и эффективное применение сил флота в удаленных районах Мирового океана;
- создание системы навигационно-гидрографического обеспечения безопасности общего мореплавания;
- проведение уникальных крупномасштабных работ по уточнению и юридическому закреплению границ внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Арктике;
- создание системы информационного обеспечения органов Государственного и военного управления данными об обстановке в Мировом океане;
- реализацию ряда крупнейших международных экономических проектов с приоритетным участием Российской Федерации в области освоения минерально-сырьевых ресурсов континентального шельфа.

В основу создания автоматизированных инерциальных навигационных комплексов, измерителей скорости и глубины, гравиметрических и магнитометрических приборов, новых типов карт (экранные, фотокарты, составленные по материалам аэрокосмической съемки, и др.), включая карты на районы высоких широт и т. д., были положены новые для того времени физические эффекты, явления и принципы.

В последние годы открыт ряд новых физических явлений и эффектов, представляющих интерес и для совершенствования существующих и для создания принципиально новых средств навигации и гидрографии.

Как показывает обобщение результатов исследований в данной области, не все направления возможного использования этих явлений и эффектов удалость к настоящему времени реализовать в технике или развить до уровня представления конкретных схем построения средств и систем навигации и гидрографии. В настоящее время по отдельным открытым физическим явлениям и эффектам имеется лишь подтверждение принципиальной возможности их применения для создания новых или модернизации существующих технических средств, что связано с объективным состоянием современного уровня исследований.

Чрезвычайно широкий диапазон разделов науки и техники, на которых могут базироваться средства навигации и гидрографии, создает определенные трудности как при поиске и отборе новых научных направлений, представляющих для рассматриваемой проблемы наибольший интерес, так и для их изучения, анализа и обобщения.

Кроме того, ряд новых направлений науки и техники, используемых в интересах создания технических средств, настолько быстро развивается, что порой их только условно можно отнести к «новым». Поэтому при оценке возможности использования наиболее перспективных из них приходится рассматривать достаточно большой спектр достижений фундаментальных и прикладных исследований и выявлять те из них, которые могут представлять интерес, но еще не нашли применения в этих областях. К настоящему времени в области НГО выявлено значительное число таких явлений и эффектов, на основе которых уже предложено создание более 40 новых средств навигации и гидрографии, что закреплено авторскими свидетельствами и патентами на изобретения.

Таким образом, технологическое развитие – это приоритетная общественная и государственная задача [5], следовательно, для ее реализации в области НГО техническая политика должна основываться на технологических инновациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2010 года. (Утверждены Указом Президента РФ от 4.03.2000 г.).
2. Морская доктрина РФ. (Утверждена Указом Президента РФ от 27.07.2001 г.).
3. Федеральный закон от 14 февраля 2009 года № 22-ФЗ «О навигационной деятельности»).
4. Федеральный закон от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».
5. Медведев Д. А. «Россия, вперед!» // Газета.ру.
6. Концепция навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности Российской Федерации. Проект. УНиО МО РФ. – 2007.
7. Комарицын А. А., Алексеев С. П., Бродский П. Г. Основы теории навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения Военно-морского флота. Военно-научный труд. Часть 1. ГУНиО МО РФ, 2003.
8. Алексеев С. П. Основные направления технической политики в области навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения морской деятельности на современном этапе // Труды конференции «НО-2007». – СПб., 2007. – С. 4–12.

**TECHNOLOGICAL INNOVATIONS AS A BASIS OF THE CURRENT TECHNICAL
POLICY IN THE SPHERE OF THE NAVIGATION-HYDROGRAPHIC SUPPORT FOR THE
MARITIME ACTIVITIES**

S. P. Alekseyev

(«GNINGI» OJSC)

Technological innovations are considered as a basis of the present-day policy in the sphere of the navigation-hydrographic support for the maritime activities. The possibilities to use the new physical phenomena, effects, and principles suitable for creation of the aids to navigation and hydrography are considered.

НАВИГАЦИЯ

ГРНТИ: 78.25.31.35.29.29.39.31

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ ВЫСОТ СВЕТИЛ, ИЗМЕРЕННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ АСТРОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

**А. В. ЛАВРЕНТЬЕВ,
М. Л. БОГДАНОВИЧ,
В. Н. КОСТИН,
С. Б. КУРСИН**
(ОАО «ГНИНГИ»)

В статье обосновываются погрешности высоты, измеренной оптической астронавигационной системой, и предлагаются способы определения поправки высоты и ее составных частей.

История развития морской астронавигации свидетельствует о постоянном стремлении штурманов к повышению точности и надежности определения координат места и поправки курса корабля астрономическим способом. Это достигается повышением точности измерения высот и азимутов астроориентиров, а также точности определения и учета инструментальных поправок.

До последнего времени, однако, повышению точности определения инструментальных поправок астронавигационных систем (АНС) не уделялось должного внимания. Поэтому нередко поправки определялись с недопустимыми погрешностями, оказывавшими влияние на обсервованные координаты места и курс корабля. Рассмотрим, с какой точностью следует определять поправки к высотам светил, измеренных оптическими АНС (ОАНС).

Известно, что исправленные высоты светил, используемые для определения места корабля, находятся по формуле

$$h = h'_{\text{оср}} + i + \Delta h_p + \Delta h_p, \quad (1)$$

где $h'_{\text{оср}}$ – осредненная измеренная высота светила;

i – поправка высоты, нередко называемая поправкой индекса; вычисляется по формуле

$$i = h_c - (h'_{\text{оср}} + \Delta h_p + \Delta h_p); \quad (2)$$

h_c – счислимая высота светила;

$\Delta h_p, \Delta h_p$ – поправки высоты на астрономическую рефракцию и параллакс.

Погрешность исправленной высоты зависит от погрешностей, с которыми не только измеряется и осредняется высота $\delta h'_{\text{оср}}$, но и от погрешностей учитываемых поправок – $\delta i, \delta(\Delta h_p), \delta(\Delta h_p)$, что можно представить выражением

$$\delta h = \delta h'_{\text{оср}} + \delta i + \delta(\Delta h_p) + \delta(\Delta h_p). \quad (3)$$

Погрешностями поправок $\delta(\Delta h_p)$ и $\delta(\Delta h_p)$, которые не превышают $1-2''$, можно пренебречь.

Тогда погрешность исправленной высоты

$$\delta h = \delta h'_{\text{оср}} + \delta i, \quad (4)$$

т. е. зависит от погрешности $\delta h'_{\text{оср}}$ измерения высоты и погрешности δi учитываемой поправки.

Полагая погрешности случайными функциями времени, напишем выражение для предельной погрешности исправленной высоты:

$$\widehat{\sigma}_h = \sqrt{\widehat{\sigma}_{h'_{\text{оср}}}^2 + \widehat{\sigma}_i^2} \quad (5)$$

Погрешность исправленной высоты можно уменьшить, повышая точность измеренной высоты и уменьшая погрешность учитываемой поправки, получаемых при увеличении числа измерений (времени осреднения). В этом случае предельная погрешность среднего значения измеренной высоты:

$$\widehat{\sigma}_{h'_{\text{оср}}} = \frac{\widehat{\sigma}_{h'}}{\sqrt{N}}, \quad (6)$$

где $\widehat{\sigma}_{h'}$ – предельная погрешность измеренной единичной высоты светила;

N – число измеренных высот светила.

Для уменьшения погрешности среднего значения измеренной высоты до приемлемой величины необходимо выбирать и проводить нужное число измерений:

$$N = \frac{\widehat{\sigma}_{h'}^2}{\widehat{\sigma}_{h'_{\text{оср}}}^2}. \quad (7)$$

Пользуясь формулой (5) для независимых измерений, можно рассчитывать необходимое число измерений для определения поправки высоты с заданной точностью. Для этой же цели можно воспользоваться табл. 1.

Из выражения (2) следует, что погрешность поправки высоты можно принять равной погрешности измерения высоты

$$\delta i = -\delta h'_{\text{оср}}, \quad (8)$$

поскольку при точно известных координатах места корабля (например, при измерениях в базе) и малой погрешности в фиксируемых моментах измерений можно принять $\delta h_c = 0$.

Таблица 1

Определение числа измерений с заданными точностью и надежностью

Погрешность $\widehat{\sigma}_{\bar{x}}$	Заданная вероятность P						
	0,683	0,8	0,9	0,95	0,99	0,997	0,999
$1 \widehat{\sigma}_x$	2	4	5	7	11	14	17
$0,5 \widehat{\sigma}_x$	6	8	13	18	31	41	50
$0,4 \widehat{\sigma}_x$	8	12	19	27	46	60	74
$0,3 \widehat{\sigma}_x$	13	20	32	45	78	103	126
$0,2 \widehat{\sigma}_x$	26	43	70	98	169	224	276
$0,1 \widehat{\sigma}_x$	101	164	270	383	661	877	1078

Погрешность поправки высоты не должна практически увеличивать погрешность исправленной высоты (формула (5)). Поэтому при определении поправки необходимо выбирать такое число измеряемых высот светил, чтобы ее погрешность составила не более 0,1–0,3 величины погрешности измеренных высот. Из табл. 1 видно, что чем точнее определяется поправка, тем большее число наблюдений надо выполнять (увеличивать время осреднения). Следовательно, в зависимости от складывающейся обстановки следует находить компромисс между точностью искомой поправки и временем ее определения. Обычно руководствуются критерием: погрешность поправки не должна превышать 0,3 величины погрешности измеряемого параметра. Степень влияния такой погрешности на исправленную высоту, как показано в табл. 2, оценивается примерно в 5%, что считается в навигационной практике приемлемым.

Таблица 2

Предельные погрешности измеренных и исправленных поправкой высот светил

Навигационный параметр	Предельная погрешность навигационного параметра			
	$P = 0,997$			
Измеренная высота	60"	30"	20"	10"
Поправка высоты	20	10	6,7	3,3
Исправленная высота	63,2	31,6	21,1	10,5
Процент увеличения погрешности	5,4 %	5,4 %	5,4 %	5,4 %

Время осреднения определяется по формуле

$$T_{\text{оср}} = N \cdot T_{\text{ц}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{оср}}$ – время осреднения измерений;

N – число измерений, выбранное из табл. 1;

$T_{\text{ц}}$ – время цикла работы цифровой вычислительной машины (ЦВМ).

Если погрешность среднего арифметического значения измеренной высоты за время осреднения $T_{\text{оср}} = 60^{\text{с}}$ задается равной $\widehat{\sigma}_{\bar{h}} = 30''$ ($P = 0,997$), то при цикле работы

ЦВМ $T_{ц} = 1^c$ число единичных измерений должно быть $N = 60$ и в соответствии с табл. 1 соотношение между предельными среднеарифметической и единичной погрешностями измерения высоты будет $\widehat{\sigma}_{\bar{h}} = 0,4\widehat{\sigma}_h$. Тогда при определении поправки высоты, чтобы ее точность в 3 раза превысила точность средней измеренной высоты и составила $\widehat{\sigma}_i = 0,3\widehat{\sigma}_{\bar{h}} = 0,3(0,4\widehat{\sigma}_h) = 0,12\widehat{\sigma}_h = 10''$, необходимо в соответствии с таблицей 1 выполнить $N \approx 750$ единичных измерений высот светила за время $T_{оср} \approx 750^c = 12,5^m$ и осреднить их. Учитывая, что поправка высоты определяется в базе, время наблюдений не ограничено и измерения можно совместить с регламентными работами по обслуживанию ОАНС. Время осреднения можно сократить увеличением частоты опроса датчиков высоты: при $T_{ц} = 0,5^c$ время осреднения уменьшится в два раза и составит $T_{оср} \approx 375^c = 6^m 15^c$.

Поправка высоты включает две составляющие – постоянную поправку $\Delta h_{п}$ измерительного канала ОАНС и поправку на наклон гиригоризонта $\Delta h_{гг}$,

$$i = \Delta h_{п} + \Delta h_{гг}. \quad (10)$$

Назовем эту поправку i полной поправкой измерительного канала ОАНС по высоте.

Для ее определения подбирают светила по всему горизонту с разностью азимутов 20–30°, измеряют высоты светил заданное число раз, вычисляют числимые высоты на момент измерений и поправки i по формуле (2) и строят график, с помощью которого определяют и учитывают инструментальную поправку измеренной высоты (рис. 1).

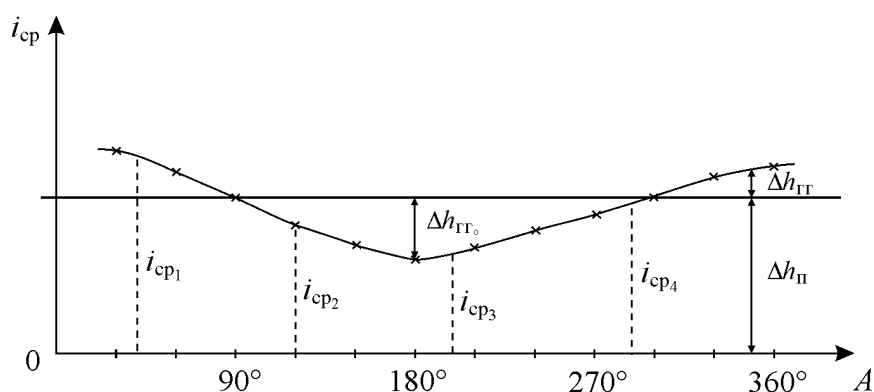


Рис. 1. Графический способ определения поправки высоты

Определенные по графику поправки не должны иметь погрешности, превышающие 1/3 единичной погрешности измерения высоты. Следовательно, измеряемые высоты каждого светила должны осредняться в течение времени, вычисленного по формуле (9). Полученные по формуле (2) осредненные для каждого светила поправки высот сглаживаются методом наименьших квадратов (МНК). Полная поправка i может изменяться в основном по причине изменения наклона гиригоризонта. Полученная МНК кривая поправок обеспечит учет i с требуемой точностью. Стабильность графика поправок i легко проверяется по 2–3 светилам, расположенным на разных азимутах.

Иногда (при отсутствии светил вследствие облачности) для определения поправки высоты можно использовать имитаторы светил – специальные устройства типа контрольного приспособления «Фонарь», принятого на вооружение Приказом ГК ВМФ № 21 от 1.02.1980 г. Сущность способа определения поправки индекса с помощью имитаторов светил состоит в сравнении истинных (моделируемых имитатором) высот с измеренными ОАНС высотами имитируемого светила. При этом поправки на рефракцию и параллакс равны нулю [1].

Нередко вместо полной поправки высоты определяются отдельно составляющие $\Delta h_{\text{п}}$ и $\Delta h_{\text{гг}}$.

Для определения постоянной поправки высоты $\Delta h_{\text{п}}$ достаточно измерить высоты двух светил на взаимно противоположных азимутах (общее число измерений выбирается из табл. 1). В этом случае по формуле (2) по азимуту A_1 вычисляется поправка высоты

$$i_1 = \Delta h_{\text{п}} + \Delta h_{\text{гг}}, \quad (11)$$

и по азимуту $A_2 = A_1 + 180^\circ$ поправка высоты

$$i_2 = \Delta h_{\text{п}} - \Delta h_{\text{гг}}. \quad (12)$$

Постоянная поправка высоты будет равна

$$i_{\text{ср}} = \frac{i_1 + i_2}{2} = \Delta h_{\text{п}}, \quad (13)$$

а поправка на наклон гиригоризонта (по направлению A_1)

$$\Delta h_{\text{гг}} = \frac{i_1 - i_2}{2}. \quad (14)$$

Поправку высоты на наклон гиригоризонта по азимуту A_i можно вычислить по формуле [1, 2]

$$\Delta h_{\text{гг}} = \Delta h_{\text{гг}o} \cos (A_i - A_{\text{гг}}), \quad (15)$$

где $\Delta h_{\text{гг}o}$ – амплитудное значение поправки высоты на наклон гиригоризонта;

A_i – азимут i -го светила;

$A_{\text{гг}}$ – азимут наклона искусственного горизонта (гиргоризонта).

Для определения амплитудного значения $\Delta h_{\text{гг}o}$ достаточно измерить высоты четырех светил, попарно расположенных на противоположных азимутах. С этой целью необходимо [1, 2]:

1) Выбрать два светила на противоположных азимутах A_1 и $A_2 = A_1 + 180^\circ$, измерить их высоты и рассчитать поправки индекса по формуле (2).

Получим:

– по азимуту A_1 :

$$i_1 = \Delta h_{\text{п}} + \Delta h_{\text{гг}1}; \quad \left. \vphantom{i_1} \right\} \quad (16)$$

– по азимуту A_2 :

$$i_2 = \Delta h_{\text{п}} - \Delta h_{\text{гг}1},$$

где Δh_{Π} – постоянная поправка высоты измерительного канала ОАНС;

$\Delta h_{\Gamma 1}$ – поправка высоты на наклон гиригоризонта в направлении азимута A_1 .

2) Аналогично найти поправки индекса i_3 и i_4 по двум другим светилам, расположенным на противоположных азимутах A_3 и A_4 :

$$\left. \begin{aligned} i_3 &= \Delta h_{\Pi} + \Delta h_{\Gamma 2}; \\ i_4 &= \Delta h_{\Pi} - \Delta h_{\Gamma 2}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

3) Используя выражение (16), составить систему двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_{\Gamma 1} &= i_1 - \Delta h_{\Pi}; \\ -\Delta h_{\Gamma 1} &= i_2 - \Delta h_{\Pi}, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

решая которую, найти

$$\Delta h_{\Gamma 1} = (i_1 - i_2)/2. \quad (19)$$

4) Аналогично решить систему двух уравнений по второй паре:

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_{\Gamma 2} &= i_3 - \Delta h_{\Pi}; \\ -\Delta h_{\Gamma 2} &= i_4 - \Delta h_{\Pi}, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

и найти

$$\Delta h_{\Gamma 2} = (i_3 - i_4)/2. \quad (21)$$

5) Составить систему из двух канонических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a \cos A_1 + b \sin A_1 &= \Delta h_{\Gamma 1}; \\ a \cos A_3 + b \sin A_3 &= \Delta h_{\Gamma 2}, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

и, решив ее, найти коэффициенты:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\Delta h_{\Gamma 1} \sin A_3 - \Delta h_{\Gamma 2} \sin A_1}{\sin(A_3 - A_1)} ; \\ b &= - \frac{\Delta h_{\Gamma 1} \cos A_3 - \Delta h_{\Gamma 2} \cos A_1}{\sin(A_3 - A_1)}. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

6) По коэффициентам a и b вычислить искомые

$$\Delta h_{\Gamma o} = \sqrt{a^2 + b^2} ; \quad (24)$$

$$A_{\Gamma} = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}. \quad (25)$$

7) По амплитудному значению поправки высоты $\Delta h_{\Gamma o}$ на наклон гиригоризонта и азимуту A_{Γ} наклона гиригоризонта по формуле (15) вычисляется

поправка высоты на наклон гирогоризонта $\Delta h_{\text{ГГ}}$ по любому измеренному на светило азимуту, которая и учитывается при исправлении измеренных высот светил.

Выводы:

1. Инструментальная поправка измеряемой высоты светила должна определяться и учитываться с погрешностью, практически не влияющей на исправленную высоту светила. Обычно эта погрешность не должна превышать 1/3 погрешности измеренной высоты.

2. При определении инструментальной поправки высоты время осреднения измеряемой высоты должно устанавливаться, исходя из требований допустимой погрешности поправки.

3. Инструментальная поправка высоты светила определяется астрономическим способом (по светилам) или с помощью имитаторов светил (контрольное приспособление «Фонарь» и др.). При этом возможно определение и учет как полной величины поправки, включающей постоянную поправку и поправку на наклон гирогоризонта, так и составных частей полной поправки.

4. Для построения кривой полной поправки высоты следует соблюдать изложенные в п. 1 требования к точности определения поправок по каждому намеченному для наблюдений светилу и полученные точки поправок сглаживать методом наименьших квадратов. Полученную сглаженную кривую целесообразно ввести в алгоритм автоматического определения и учета инструментальной поправки высоты по входному аргументу – азимуту наблюдаемого светила.

5. При определении составных частей полной инструментальной поправки высоты следует выбирать светила попарно на противоположных азимутах (или близких к ним). По двум светилам на противоположных азимутах определяется постоянная поправка измерительного высотного канала АНС и поправка высоты на наклон гирогоризонта в направлении азимута светила.

6. Для определения величины и азимута наклона гирогоризонта в любом направлении следует использовать попарно расположенные на противоположных азимутах четыре светила. Задача нахождения величины и азимута наклона гирогоризонта может быть решена аналитически или графически.

7. Предложенные способы определения инструментальной поправки высоты позволяют обеспечить заданные точности измерения высот светил, особенно применительно к высокоточным ОАНС. Способы применимы для всех оптически видимых небесных светил, включая Солнце, Луну, планеты и звезды. Поправка высоты и ее погрешность определяются в угловых секундах или минутах, в зависимости от размерности заданной точности измерений ОАНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев А. В., Костин В. Н. и др. Методика определения инструментальных поправок астронавигационных систем кораблей ВМФ. – СПб: ГУНиО МО РФ, 2007. – Адм. № 9655. – 35 с.
2. Лаврентьев А. В., Костин В. Н. Определение и учет погрешности на наклон гирогоризонта в астронавигационных системах // Записки по гидрографии. – 2007. – № 270. – С. 23–30.

FINDING THE CORRECTION FOR THE CELESTIAL ALTITUDES MEASURES BY THE OPTICAL ASTRONAVIGATION SYSTEM WITH A SET ACCURACY

**A.V. Lavrentyev, M. L. Bogdanovich,
V. N. Kostin, S. B. Kursin**
(«GNINGI» OJSC)

The errors of altitudes measured by the optical astronavigation system are substantiated. The methods of finding the correction for the altitude and its components are proposed.

ГРНТИ: 78.25.31.35.29.29.39.31

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ И НАДЕЖНОСТЬЮ
ПОПРАВК АЗИМУТА, ИЗМЕРЕННОГО ОПТИЧЕСКОЙ
АСТРОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ**

**А. В. ЛАВРЕНТЬЕВ,
М. Л. БОГДАНОВИЧ,
В. Н. КОСТИН,
С. Б. КУРСИН**
(ОАО «ГНИНГИ»)

В статье обосновываются погрешности азимута, измеренного оптической астронавигационной системой, и предлагаются способы определения поправки азимута и ее составных частей.

Измеренный азимут является одним из важнейших навигационных параметров, от которого зависит точность определения места, поправки курса корабля и ориентирование на местности. Обозначившаяся возможность создания высокоточных оптических астронавигационных систем (ОАНС) и практика военного кораблевождения предъявляют повышенные требования к точности и надежности измерения высот и азимутов небесных светил, а также к определению их инструментальных поправок.

Известно, что измеренный ОАНС азимут светила представляет собой алгебраическую сумму компасного курса КК корабля и измеренного курсового курса q' на светило

$$A' = КК + q'. \quad (1)$$

Представим составляющие азимута в виде:

$$КК = ИК + \delta K_{п} + \delta K_{пер}(t) + \delta K_{сл}(t); \quad (2)$$

$$q' = q + \delta q_{п} + \delta q_{гр} + \delta q_{сл}(t), \quad (3)$$

где ИК – истинный курс корабля;

$\delta K_{п}$, $\delta K_{пер}(t)$, $\delta K_{сл}(t)$ – постоянная, периодически меняющаяся и случайная погрешности курса – составляющие общей погрешности курса

$$\delta K(t) = \delta K_{п} + \delta K_{пер}(t) + \delta K_{сл}(t); \quad (4)$$

q – истинный курсовой угол на светило;

$\delta q_{\text{п}}$ – постоянная составляющая погрешности курсового угла, обусловленная главным образом неточностью установки перископного устройства АНС в диаметральной плоскости (ДП) корабля;

$\delta q_{\text{гг}}$ – составляющая погрешности курсового угла, обусловленная наклоном гиригоризонта по отношению к истинному горизонту;

$\delta A_{\text{сл}}(t)$ – случайная погрешность измеренного курсового угла.

Подставляя выражения (2) и (3) в формулу (1), получим выражение для измеренного азимута в виде

$$A' = \text{ИК} + q + \delta K_{\text{п}} + \delta K_{\text{пер}}(t) + \delta q_{\text{п}} + \delta q_{\text{гг}} + \delta A_{\text{сл}}(t). \quad (5)$$

Обозначая $\text{ИК} + q = A_{\text{и}}$, перепишем (5) в виде

$$A' = A_{\text{и}} + \delta K_{\text{п}} + \delta q_{\text{п}} + \delta q_{\text{гг}} + \delta K_{\text{пер}}(t) \pm \delta A_{\text{сл}}(t), \quad (6)$$

где $A_{\text{и}}$ – истинный азимут светила, равный сумме истинного курса ИК и истинного курсового угла q ;

$\delta A_{\text{сл}}(t)$ – случайная погрешность измеренного азимута, обусловленная взаимодействием случайных погрешностей курса $\delta K_{\text{сл}}(t)$ и курсового угла $\delta q_{\text{сл}}(t)$.

Из выражения (6) следует, что измеренный азимут отягощен систематическими погрешностями курса $\delta K_{\text{п}}$, $\delta K_{\text{пер}}(t)$, курсового угла $\delta q_{\text{п}}$, $\delta q_{\text{гг}}$ и случайной погрешностью $\delta A_{\text{сл}}(t)$ измеренного азимута.

Преобразовывая (6), найдем выражение для разности истинного и измеренного азимуты, которая содержит рассмотренные выше составляющие погрешности:

$$\Delta A = A_{\text{и}} - A' = -\delta K_{\text{п}} - \delta q_{\text{п}} - \delta q_{\text{гг}} - \delta K_{\text{пер}}(t) \pm \delta A_{\text{сл}}(t). \quad (7)$$

Среднюю квадратическую погрешность (СКП) поправки измеренного азимута можно оценить по формуле

$$\sigma_{\Delta A} = \sqrt{\sigma_{K_{\text{п}}}^2 + \sigma_{q_{\text{п}}}^2 + \sigma_{q_{\text{гг}}}^2 + \sigma_{K_{\text{пер}}}^2 + \sigma_{A_{\text{сл}}}^2}, \quad (8)$$

где $\sigma_{K_{\text{п}}}$, $\sigma_{q_{\text{п}}}$, $\sigma_{q_{\text{гг}}}$, $\sigma_{K_{\text{пер}}}$, $\sigma_{A_{\text{сл}}}$ – СКП случайных независимых составляющих разности азимуты.

Чтобы погрешность разности азимуты не превышала заданной величины, необходимо, как следует из формулы (8), иметь каждую из составляющих разности азимуты (считая их одинаковыми) равной

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_{\Delta A}}{\sqrt{5}},$$

где ε_i – i -я составляющая погрешности разности азимуты;

$\varepsilon_{\Delta A}$ – погрешность разности азимуты.

Каждая составляющая разности азимуты в формуле (7) должна определяться с СКП, меньшей заданной погрешности измеренного азимута в $\sqrt{5}$ раз. При неравенстве составляющих разности азимуты следует учитывать их весовые коэффициенты.

Переходя от погрешностей в правой части выражения (7) к поправкам, получим выражение для разности азимутов в виде

$$\Delta A = A_{\text{и}} - A' = \Delta K_{\text{п}} + \Delta q_{\text{п}} + \Delta q_{\text{гг}} + \Delta K_{\text{пер}}(t) \pm \delta A_{\text{сл}}(t), \quad (9)$$

которую можно рассматривать как **поправку измеренного азимута**.

Из (9) следует, что поправка азимута в общем случае включает:

- постоянную поправку курса $\Delta K_{\text{п}}$;
- переменную поправку курса $\Delta K_{\text{пер}}(t)$;
- постоянную поправку курсового угла $\Delta q_{\text{п}}$;
- поправку курсового угла на наклон гирогоризонта $\Delta q_{\text{гг}}$;
- случайную погрешность $\delta A_{\text{сл}}(t)$ измеренного азимута.

Случайная погрешность разности азимутов $\delta A_{\text{сл}}(t)$ является случайной функцией времени. При измерении 3–5 азимутов точность среднего измеренного азимута увеличится примерно на 30–50%. Чтобы случайную погрешность измеренного азимута $\delta A_{\text{сл}}(t)$ уменьшить в несколько раз, до пренебрежительно малого значения, требуемое число измеряемых азимутов следует выбирать из таблицы.

Определение числа измерений с заданными точностью и надежностью

Погрешность $\widehat{\sigma}_{\bar{x}}$	Заданная вероятность P						
	0,683	0,8	0,9	0,95	0,99	0,997	0,999
$1 \widehat{\sigma}_x$	2	4	5	7	11	14	17
$0,5 \widehat{\sigma}_x$	6	8	13	18	31	41	50
$0,4 \widehat{\sigma}_x$	8	12	19	27	46	60	74
$0,3 \widehat{\sigma}_x$	13	20	32	45	78	103	126
$0,2 \widehat{\sigma}_x$	26	43	70	98	169	224	276
$0,1 \widehat{\sigma}_x$	101	164	270	383	661	877	1078

По выбранному числу измерений можно рассчитать время осреднения (сглаживания) измеренных азимутов (курсовых углов) для данной АНС

$$T_{\text{оср}} = N \cdot T_{\text{ц}}, \quad (10)$$

где N – требуемое число измерений, выбираемое из таблицы;

$T_{\text{ц}}$ – время цикла работы ЦВМ при опросе датчиков измеряемой ОАНС информации.

Постоянная поправка вырабатываемого курса $\Delta K_{\text{п}}$ определяется в базе и должна быть известной [1].

Переменная поправка курса $\Delta K_{\text{пер}}(t)$ изменяется по закону, близкому к синусоидальному. При стоянке корабля в базе ее можно определить по специальной методике [1] и исключить из общей поправки курса

$$\Delta K(t) = \Delta K_{\text{п}} + \Delta K_{\text{пер}}(t) + \Delta K_{\text{сл}}(t), \quad (11)$$

у которой случайная часть поправки $\Delta K_{cl}(t)$ в среднем результате заданного числа измерений доведена до пренебрежимо малого значения. В море периодически изменяющаяся часть поправки неизвестна, что снижает точность определения разности азимутов и должно учитываться при оценке получаемого результата.

Постоянная поправка курсового угла $\Delta q_{п}$ определяется различными способами при нахождении корабля в базе [1] и учитывается при исправлении азимутальных измерений в море. В море постоянная поправка $\Delta q_{п}$ может определяться у ОАНС, имеющих специальное фотоэлектрическое устройство внутренней выверки по курсовому углу (например, в астрокорректорах устройство «Спин»), предназначенное для определения поправки на неточность выставки перископа в ДП корабля.

Поправка $\Delta q_{гг}$ предназначена для компенсации погрешности $\delta q_{гг}$, обусловленной наклоном гиригоризонта и имеющей полукруговой характер [1, 2]:

$$\delta q_{гг} = \delta q_{гг_0} \sin(A' - A_{гг}) \operatorname{tg} h, \quad (12)$$

где $\delta q_{гг_0}$ – амплитудная величина погрешности курсового угла;

A' – измеренный азимут светила;

$A_{гг}$ – азимут наклона гиригоризонта;

h – высота светила.

У высокоточных гиригоризонтов в составе ОАНС погрешность уменьшается до приемлемой величины регулировкой. У простейших гиригоризонтов эта погрешность не устраняется регулировкой. Для ее исключения пользуются поправкой [1, 2]:

$$\Delta q_{гг} = \Delta q_{гг_0} \sin(A' - A_{гг}) \operatorname{tg} h. \quad (13)$$

Погрешность на наклон гиригоризонта можно устранить методическим приемом, измеряя азимуты двух светил, отличающиеся на 180° (или близкие к ним), и рассчитывая поправки:

– по первому светилу

$$\Delta A_1 = A_{c1} - A'_1 \quad (14)$$

– и по второму светилу (противоположному по азимуту)

$$\Delta A_2 = A_{c2} - A'_2, \quad (15)$$

где A_{c1} и A_{c2} – числимые азимуты светил;

A'_1 и A'_2 – измеренные азимуты светил.

В расчет принимается средняя поправка азимута

$$\Delta A_{cp} = \frac{\Delta A_1 + \Delta A_2}{2}, \quad (16)$$

которая свободна от погрешности $\delta q_{гг}$.

Поправки измеренного азимута можно определять различными способами:

- астрономическим способом по разности азимутов (счислимого и измеренного);
- астрономическим способом с помощью теодолита, установленного в ДП корабля;

- по береговому теодолитному посту;
- по береговому ориентиру.

Астрономический способ определения поправок азимута, курса и курсового угла по разности азимутов

Разность азимутов вычисляется по формуле:

$$\Delta A = A_c - A', \quad (17)$$

где A_c – счислимый азимут светила, полученный на основе известных (счислимых) координат места корабля и зафиксированного момента времени;

A' – измеренный азимут светила.

Применительно к ОАНС измеренный азимут определяется формулой (1), а его погрешность – формулой (6).

Точность счислимого азимута зависит от точности знания координат места корабля и замеченного момента времени. Эту погрешность обозначим δA_c .

Разность азимутов ΔA (формула (17)) содержит погрешности измеренного и счислимого азимутов:

$$\Delta A = \delta A_c - \delta K_{\text{п}} - \delta K_{\text{пер}}(t) - \delta q_{\text{п}} - \delta q_{\text{гг}} \pm \delta A_{\text{сл}}(t). \quad (18)$$

Обычно, азимут светила измеряется для определения поправки курса (формула 11). Заменяя в выражении (18) погрешности поправками и сделав преобразования, получим формулу для текущей единичной поправки курса

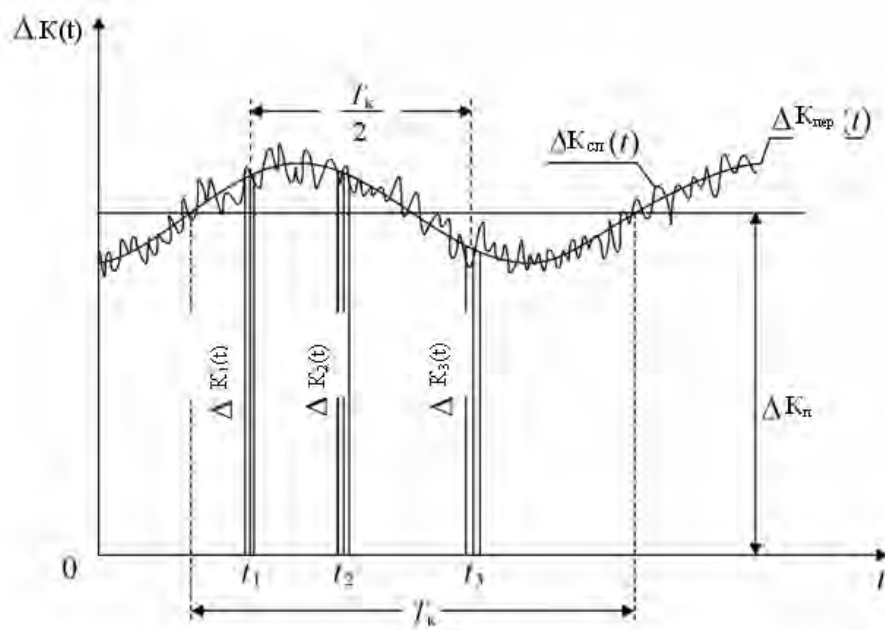
$$\Delta K(t) = \Delta K_{\text{п}} + \Delta K_{\text{пер}}(t) + \Delta K_{\text{сл}}(t) = \Delta A + \Delta A_c - \Delta q_{\text{п}} - \Delta q_{\text{гг}} \pm \delta A_{\text{сл}}(t).$$

Для уменьшения влияния случайной погрешности $\delta A_{\text{сл}}(t)$ определяется ряд поправок азимута ΔA и вычисляется среднее значение текущей поправки курса

$$\Delta K(t)_{\text{ср}} = \Delta A_{\text{ср}} + \Delta A_c - \Delta q_{\text{п}} - \Delta q_{\text{гг}}. \quad (19)$$

Из формулы (19) видно, что для определения поправки курса необходимо, в общем случае, среднюю разность азимутов исправлять поправкой ΔA_c счислимого азимута (или погрешность δA_c свести к минимально допустимой величине за счет высокоточной обсервации и точной фиксации моментов времени), постоянной поправкой курсового угла $\Delta q_{\text{п}}$, определяемой в базе, и поправкой курсового угла $\Delta q_{\text{гг}}$, исключающей погрешность курсового угла наклон гиригоризонта. Все поправки должны определяться и учитываться с минимально допустимыми погрешностями.

Полученную по формуле (19) поправку курса необходимо оценивать с учетом как ее случайной, так и периодически изменяющейся погрешности, показанной на рисунке, где также показано текущее значение поправки курса $\Delta K(t)$ и постоянная поправка $\Delta K_{\text{п}}$.



Изменение поправки курса во времени

Постоянная поправка курсового угла $\Delta q_{\text{п}}$ определяется в базе при точно известных координатах места корабля. Полученная разность азимутов (счислимого и измеренного) исправляется поправкой курса $\Delta K(t)$, определенной на момент измерения азимута, и поправкой на наклон гиригоризонта (если она известна). Постоянная поправка курсового угла равна:

$$\Delta q_{\text{п}} = \Delta A - \Delta K(t) - \Delta q_{\text{гг}}. \quad (20)$$

Если $\Delta q_{\text{гг}}$ неизвестна, что нередко бывает на практике, рекомендуется поправку $\Delta q_{\text{п}}$ определять по двум светилам на противоположных азимутах (или близких к ним) и в расчет принимать среднюю поправку, которая не будет содержать погрешности на наклон гиригоризонта [1, 2].

Астрономический способ определения поправки курса с использованием спецтеодолита, установленного в диаметральной плоскости корабля

Сущность способа состоит в сравнении курсовых углов на светило (отдаленный береговой ориентир), одновременно измеренных спецтеодолитом, установленным в ДП корабля, и астронавигационным перископом ОАНС с фиксацией моментов времени на моменты измерения азимутов.

По разности курсовых углов находится постоянная поправка курсового угла перископа

$$\Delta q_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n \Delta q_{\text{п}i} / n, \quad (21)$$

где $\Delta q_{\text{п}i}$ – единичная поправка курсового угла ОАНС, равная

$$\Delta q_{ni} = q_{ti} - q_{pi}; \quad (22)$$

q_{ti} – курсовой угол, измеренный теодолитом, установленным в ДП;

q_{pi} – курсовой угол, измеренный ОАНС.

Вычисленные (счислимые) азимуты на фиксируемые моменты времени сравниваются с измеренными азимутами. Полученные разности

$$\Delta A_i = A_c - A_i' \quad (23)$$

осредняются при заданном числе измерений (в соответствии с таблицей) для достижения требуемых точностей определения инструментальных поправок Δq_n и $\Delta q_{гг}$ и уменьшения случайной погрешности измеренного азимута $\delta A_{cl}(t)$ до приемлемого значения. Поправка курса $\Delta K(t)_{cp}$ определяется по формуле (19) аналогично рассмотренному выше астрономическому способу по разности азимутов.

Определение поправки курса способом взаимного визирования с теодолитным постом

Способ определения поправки курса по отдаленному береговому ориентиру не обеспечивает необходимой точности определения поправки курса перспективных ОАНС, так как предельная погрешность определения *ИП* ориентира обычно превышает 6–8' ($P = 0,997$). В качестве берегового ориентира лучше использовать береговой теодолитный пост (БТП). С БТП на корабль измеряется дирекционный угол (предельная погрешность 1–2', $P = 0,997$). Исправляя дирекционный угол поправкой на схождение меридианов, известной, обычно с предельной погрешностью 1,0' ($P = 0,997$), вычисляется истинный пеленг $ИП = T + \gamma + 180^\circ$ с корабля на БТП.

При сличении истинного пеленга с компасным, измеренным перископом ОАНС на БТП, находится разность пеленгов (азимутов):

$$\Delta П(t) = ИП - КП(t), \quad (24)$$

где $\Delta П(t)$ – разность истинного и компасного пеленгов с корабля на БТП;

$ИП = T + \gamma + 180^\circ$ – истинный пеленг с корабля на БТП;

$КП = КК + q'$ – компасный пеленг с корабля на БТП;

T – дирекционный угол с БТП на корабль;

γ – угол схождения меридианов.

Если (φ_1, λ_1) и (φ_2, λ_2) – координаты корабля и БТП, соответственно, то $\gamma = (\lambda_2 - \lambda_1) \sin \varphi_{cp}$; средняя широта $\varphi_{cp} = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$;

$КК$ – компасный курс корабля;

q' – измеренный курсовой угол с корабля на БТП.

Раскрывая выражение (24), получим

$$\begin{aligned} \Delta П(t) &= ИП - КП(t) = (T + \gamma + 180^\circ) - (КК + q') = \\ &= T + \gamma + 180^\circ - ИК - \delta K_n - \delta K_{пер}(t) - \delta K_{cl}(t) - q - \delta q_n - \delta q_{гг} - \delta q_{cl}(t). \end{aligned} \quad (25)$$

Учитывая, что при большом числе измерений (в соответствии с таблицей) случайная погрешность $\delta A_{cl}(t) \approx 0$, имеем

$$\Delta П(t) = -\delta K(t) - \delta q_n - \delta q_{гг}. \quad (26)$$

Переходя от погрешностей к поправкам, получим

$$\Delta\Pi(t) = \Delta K(t) + \Delta q_{\Pi} + \Delta q_{ГГ}, \quad (27)$$

откуда поправка курса:

$$\Delta K(t) = \Delta\Pi(t) - \Delta q_{\Pi} - \Delta q_{ГГ}. \quad (28)$$

Поправка Δq_{Π} определяется в базе [1]. Погрешность $\delta q_{ГГ}$ уменьшается до приемлемой величины регулировкой (у высокоточных гиригоризонтов) или устраняется определением и учетом поправки (у простейших гиригоризонтов) [1, 2]. Измеряя направления на два БТП, расположенных на противоположных азимутах (или близких к ним), рассчитывают разности пеленгов по каждому БТП:

$$\Delta\Pi_1 = \text{ИП}_1 - \text{КП}_1; \quad (29)$$

$$\Delta\Pi_2 = \text{ИП}_2 - \text{КП}_2.$$

Среднее значение разности пеленгов

$$\Delta\Pi_{\text{ср}} = \frac{\Delta\Pi_1 + \Delta\Pi_2}{2} = \Delta K(t) + \Delta q_{\Pi}, \quad (30)$$

следовательно:

$$\Delta K(t) = \Delta\Pi_{\text{ср}} - \Delta q_{\Pi}. \quad (31)$$

Для повышения точности учитываемой поправки $\Delta K(t)$ следует вести график $\Delta K(t)$, подобный изображенному на рисунке, и по нему определять поправку курса на момент определения среднего азимута на светило. При определении текущих значений поправки курса необходимо выполнять требования к измерениям в соответствии с таблицей.

Выводы:

1. Измеренный ОАНС азимут на светило отягощен систематическими и случайными погрешностями. Результирующая систематическая погрешность обусловлена погрешностью вырабатываемого корабельным курсоуказателем (ИНС, ГК) курса, погрешностью выставки астронавигационного перископа в ДП корабля, погрешностью выработки и хранения гиригоризонта. Случайная погрешность измеренного азимута является результатом взаимодействия случайных погрешностей текущего значения курса и измеренного курсового угла на светило.

2. Для измерения азимута на светило с необходимой точностью следует выбирать время осреднения (сглаживания) измерений, исходя из рекомендации выбора числа измерений для получения среднего значения измеренного азимута с заданной точностью, пользуясь таблицей «Определения числа измерений с заданной точностью и надежностью».

3. Для определения поправки курса по светилам обычно пользуются способом разности счислимого (вычисленного) и измеренного азимутов. При этом часто за поправку курса принимают полученную разность азимутов, с чем нельзя согласиться, поскольку разность азимутов включает, кроме случайной погрешности (которую уменьшают до минимально возможной величины, увеличивая число измерений), систематические погрешности вычисленного азимута (зависящие от точности знания

координат места корабля и точности фиксируемого времени измерений) и систематические погрешности измеренного курсового угла (постоянная и наклон гирогоризонта).

4. Для выделения из полученной разности азимутов поправки курса с заданной точностью необходимо перед измерением серии азимутов на светило возможно более точно определить координаты места корабля и фиксировать время наблюдений с максимальной точностью (сводится к минимуму погрешность счислимого азимута) и разность азимутов исправлять постоянной поправкой курсового угла (определяется в базе по специальной методике) и поправкой курсового угла наклон гирогоризонта. Если поправка на наклон гирогоризонта не известна, то для ее исключения из разности азимутов следует измерения проводить по светилам на противоположных азимутах и в расчет принимать среднюю разность азимутов, которая будет свободна от погрешности курсового угла, которая обусловлена наклоном гирогоризонта.

5. Постоянная поправка курсового угла определяется в базе известными способами. Чтобы эта поправка не ухудшала заметно точность получаемой поправки курса, она должна определяться с более высокой точностью, чем полученная разность азимутов. Наиболее приемлемыми для этого случая способами определения постоянной поправки курсового угла являются способы с использованием высокоточных теодолитов (взаимное визирование с береговым теодолитным постом или с помощью специализированного теодолита, установленного в ДП корабля).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев А. В., Костин В. Н. и др. Методика определения инструментальных поправок астронавигационных систем кораблей ВМФ. – СПб.: ГУНиО МО РФ, 2007. – Адм. № 9655. – 35 с.
2. Лаврентьев А.В., Костин В.Н. Определение и учет погрешности на наклон гирогоризонта в астронавигационных системах // Записки по гидрографии. – 2007. – № 270. – С. 23–30.

DETERMINATION WITH A SET ACCURACY AND RELIABILITY OF CORRECTIONS FOR THE AZIMUTH MEASURED BY THE OPTICAL ASTRONAVIGATION SYSTEM

**A.V. Lavrentyev,
M. L. Bogdanovich,
V. N. Kostin,
S. B. Kursin.**
(«GNINGI» OJSC)

The errors of the azimuth measured by the optical astronavigation system are substantiated. The methods that can be used to determine the correction of the azimuth and its components are proposed.

ПЛАВУЧИЙ ПРЕДОСТЕРЕГАТЕЛЬНЫЙ ЗНАК С ИНЕРЦИОННО-ПОРШНЕВОЙ ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

**М. Л. БОГДАНОВИЧ,
Е. П. ГЛАДСКИХ,
Ю. А. ГЛУХОВ,
В. А. МАКСИМОВ**
(ОАО «ГНИНГИ»)

В статье рассматривается вариант использования энергии морских волн в плавучих предупредительных знаках, адаптированных к эксплуатации в ледовых условиях

Проблема использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в средствах навигационного оборудования (СНО) в настоящее время актуальна. Наиболее остро стоит вопрос использования ВИЭ в плавучих предупредительных знаках (ППЗ), в которых по-прежнему единственным источником энергии остаются химические источники тока (ХИТ), не имеющие подзарядных устройств. Это обстоятельство обуславливает непродолжительный рабочий цикл энергосистемы ППЗ и вызывает, в свою очередь, необходимость трудоемкой и дорогостоящей работы по частой замене ХИТ с привлечением плавсредств.

Ниже предлагается вариант автономной волновой энергетической установки ППЗ, значительно увеличивающей непрерывный цикл их работы и защищенной от ледовых повреждений.

Интерес к волновым энергетическим установкам вызван наиболее высоким коэффициентом преобразования энергии среди прочих ВИЭ. На лучших установках, в оптимальном режиме, коэффициент отбора волновой энергии достигает 70–90% [1].

В настоящее время за рубежом эксплуатируется около 400 буев с волновыми энергетическими установками. Как правило, находят применение ППЗ, использующие такие типы установок, как «поплавок с гидротурбиной» и «пневмобуй Масуды» [1]. Рабочее тело таких энергетических установок (гидротурбина или поршень) находится в непосредственном контакте с морской водой. Это обуславливает коррозию, биологическое обрастание и механические повреждения рабочего тела установки в штормовых и особенно, ледовых условиях.

В процессе изучения данного вопроса удалось найти оригинальное техническое решение, позволяющее поместить энергоустановку внутри герметичного корпуса буя и тем самым обезопасить ее от ледовых повреждений (рис. 1).

Работа предложенной инерционно-поршневой волновой энергетической установки (ИПВЭУ) основана на резонансных колебаниях инерционного поршня (рабочего тела установки) 15 с пружинными амортизаторами 16 в воздушной камере 14, жестко скрепленной с корпусом буя 3. Колебания инерционного поршня вверх и вниз обеспечивают подачу сжатого воздуха по воздухопроводным трубкам 18 на лопатки рабочего колеса воздушной турбины Уэллса 13, жестко скрепленного с ротором генератора постоянного тока 11. Генератор имеет реле-регулятор напряжения 12.

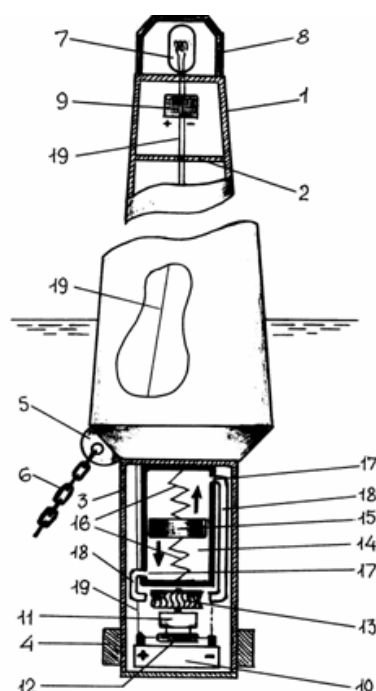


Рис.1. Буй морской большой ледовый с инерционно-поршневой волновой энергетической установкой. Объяснения в тексте

При выработке генератором более высокого напряжения, чем внутреннее напряжение накопителя энергии 10, начинается процесс накопления энергии. После полного заряда накопителя энергии реле-регулятор напряжения переключает генератор на электрическую цепь 19 механизма подключения светооптической аппаратуры 9.

Изменяя массу поршня, упругость пружин или диаметр воздухопроводных трубок, можно «настраивать» преобразователь волновой энергии на любую волну, характерную для конкретной морской акватории.

Сам буй уже является первым звеном преобразователя энергии в многоступенчатой системе, которую представляют собой волновые энергетические установки – под воздействием волн буй совершает вертикальные колебания.

Оценим мощность и энергию колебаний груза, свободно подвешенного на пружине внутри осциллирующего буя. Для этого произведем расчет в два этапа: сначала определим параметры колебаний буя в зависимости от параметров колебаний волн, а затем – параметры колебаний груза в зависимости от параметров колебаний буя.

Для регулярных волн основными параметрами являются: высота волны – H ; период волны – T ; длина волны – λ ; частота волны – ω .

Для примера оценим период и частоту собственных колебаний отечественного большого морского буя ледового типа БМБЛ-78, широко применяемого в навигационных целях Гидрографической службой.

Основные параметры бую, необходимые для этой оценки таковы [2]:

- диаметр корпуса по ватерлинии, $D = 1,55$ м;
- осадка, $h = 5,6$ м;
- масса, $m = 5000$ кг;
- площадь ватерлинии, $A_{пв} = 1,89$ м²;
- присоединенная масса воды, $m_{в} = 0,167 \rho D^3 = 620$ кг.

Определим период собственных колебаний T_z этого бую [4]:

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{m + m_{в}}{\rho g A_{пв}}} = 3,46 \text{ с.} \quad (1)$$

Определим частоту собственных колебаний ω_z бую [4]:

$$\omega_z = \frac{2\pi}{T} = 1,82 \text{ 1/с.} \quad (2)$$

Логично предположить, что рабочий диапазон частот колебаний бую будет максимальным в условиях резонанса. Определим эти условия.

Длина резонансной волны, λ_z [4]:

$$\lambda_z = \frac{gT^2}{2\pi} = 18,7 \text{ м.} \quad (3)$$

Высота резонансной волны, H_z [4]:

$$H_z = \frac{\lambda_z}{10\pi} = 0,59 \text{ м.} \quad (4)$$

Из анализа публикаций по опыту использования волновых энергетических установок следует, что мощность преобразованной волновой энергии напрямую зависит от интенсивности волнения. Другими словами, чем выше волны, тем больше мощность энергоустановки [1].

Проверим это утверждение применительно к исследуемому БМБЛ-78. Для этого произведем расчеты для резонансной волны $H_z = 59$ см, а также для волн высотой 1 м и 3 м.

В общем случае амплитуда вертикальных колебаний бую определяется по формуле [4]:

$$Z_0 = \frac{F_0 / \rho g A_{пв}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_z}\right)^2\right]^2 + \left(2\Delta_z \frac{\omega}{\omega_z}\right)^2}}. \quad (5)$$

Величина осциллирующей силы определяется по формуле [4]:

$$F_0 = \frac{\rho g H}{4} \pi R^2 \left(1 - \frac{\pi^2 R^2}{2\lambda} \right) \left(e^{-2\pi \frac{h}{\lambda}} + 1 \right). \quad (6)$$

Механическая энергия осциллирующего буга за период колебания определяется по формуле [4]:

$$E = \frac{1}{2} \left[(m + m_B) \omega^2 + \rho g A_{\text{ПВ}} \right] Z_0^2. \quad (7)$$

Мощность определяется выражением [4]:

$$N = \frac{E}{T}. \quad (8)$$

Вычисленные параметры, характеризующие колебания буга при различных режимах волнения, приведены в таблице.

Параметры колебаний буга при различных режимах волнения

Параметры волны	$H, \text{ м}$	0,59	1	3
	$\omega, 1/\text{с}$	1,82	1,256	0,628
	$T, \text{ с}$	3,46	5	10
Параметры колебаний буга	$F_0, \text{ н}$	3116	6500	25000
	$Z_0, \text{ м}$	0,85	0,65	1,53
	$E, \text{ Дж}$	13130	5800	24400
	$N, \text{ Вт}$	3800	1160	2440

Полученные результаты показывают, что мощность N , преобразуемая бугем как элементом первой ступени преобразования волновой энергии, достигает наибольшего значения при резонансной волне высотой 59 см. Результат оптимистичный – волна высотой 3 м и более бывает не так уж часто, а волна в 59 см практически всегда и везде имеет место.

В качестве второй ступени преобразователя мощности вертикальных колебаний буга рассмотрим груз (рабочее тело волновой установки), подвешенный внутри буга с помощью цилиндрической пружины круглого сечения, жестко связанной с его корпусом.

Уравнение колебаний этого груза есть уравнение вынужденных упругих колебаний с вязким сопротивлением, пропорциональным скорости, которое записывается в виде [4]:

$$m_r \ddot{x} + c \dot{x} + kx = P_0 \sin \omega t, \quad (9)$$

где m_r – масса груза;

x – амплитуда колебаний груза;

c – коэффициент вязкой силы;

k – коэффициент жесткости пружины.

Масса груза, амплитуда его колебаний и жесткость пружины должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить заданную полезную мощность преобразователя волновой энергии, необходимую для функционирования системы с

учетом потерь в генераторе и накопителе энергии при параметрах волнового процесса, находящегося в пределах рассматриваемого диапазона (см. таблицу).

Очевидно, что оптимальным решением, обеспечивающим наиболее эффективное использование энергии колебаний, является резонансный преобразователь, собственная частота колебаний которого равна частоте возмущающей силы.

Правая часть выражения (9) представляет собой формулу периодической возмущающей силы, передаваемой через корпус буя. Величина возмущающей силы связана с величиной осциллирующей силы соотношением [4]:

$$P_0 = F_0 \frac{m_r}{m + m_b}. \quad (10)$$

Полезная мощность колебаний груза выражается формулой [4]:

$$N_r = \frac{P_0^2 \cdot c / m_r}{m_u \cdot 2p \left[\left(\frac{p}{\omega} - \frac{\omega}{p} \right)^2 - \left(\frac{c}{m_r} \cdot p \right)^2 \right]}, \quad (11)$$

где p – частота собственных колебаний груза, которая определяется выражением [4]

$$p = \sqrt{\frac{\kappa}{m_z}}. \quad (12)$$

В условиях резонанса, т. е. при $p = \omega$, уравнение (11) принимает вид [4]:

$$N_z = F_0^2 \cdot \left(\frac{m_z}{m + m_b} \right)^2 \cdot \frac{1}{2c}. \quad (13)$$

Величина « c » при проектировании должна быть подобрана таким образом, чтобы расчетная величина мощности соответствовала среднему за период колебания квадрату скорости перемещения груза [4]

$$N_z = c \cdot x_{cp}^2. \quad (14)$$

При синусоидальном законе перемещения груза [4]:

$$x_{cp}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2 \cdot dt = \frac{x_0^2 \cdot \omega^2}{2}. \quad (15)$$

Из уравнений (14) и (15) величина коэффициента вязкой силы « c » определится таким образом [4]:

$$c = \frac{2N_r}{x_0^2 \cdot \omega^2}. \quad (16)$$

Коэффициент жесткости пружины k определяется как отношение возмущающей силы к амплитуде вертикального перемещения груза.

Ориентировочные расчеты системы пружинной подвески груза показывают, что длина пружины обычной конструкции получается слишком большой для габаритов буя – около 7,5 м. Причем большая часть длины пружины используется для удержания массы груза и лишь малая ее часть – для организации резонансного колебательного процесса. Кроме того, свободная подвеска груза в условиях резонанса может привести к разрыву пружины.

Таким образом, техническое решение этой задачи заключается в разгрузке пружины от действия массы груза. В предложенной ИПВЭУ используется демпфирующее устройство, состоящее из пружинных амортизаторов, осуществляющих подвеску инерционного поршня с двух сторон (сверху и снизу). Поскольку работа ИПВЭУ рассчитана на резонансный режим колебаний, такая система подвески является оптимальной и предохранит установку от поломок.

Выводы:

1. В БМБЛ, как и во всех зимних ППЗ, единственным источником энергоснабжения являются химические источники тока (ХИТ), не имеющие подзарядных устройств. Частая замена ХИТ в ППЗ с экономической точки зрения крайне невыгодна.

2. Предложенная ИПВЭУ, помещённая внутри герметичного корпуса буя, предохраняется им от ледовых повреждений. Благодаря такой конструкции ППЗ становится пригодным к круглогодичной эксплуатации и не требует обслуживания, связанного с заменой блоков питания.

3. Использование ИПВЭУ в качестве подзарядного устройства накопителя энергии (аккумулятора) увеличивает непрерывный рабочий цикл энергосистемы ППЗ и сокращает расходы на их эксплуатацию. Непрерывный цикл работы ППЗ в таком случае будет определяться сроком эксплуатации аккумулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Снегирев А. «Энергетика будущего» – СПб., изд. «Беллона», 2008. – 25 с.
2. Справочник по средствам навигационного оборудования, часть I – СПб.: изд. ГУНиО МО СССР, 1983. – 378 с.
3. Дополнение №1 к Справочнику по средствам навигационного оборудования, часть I – СПб.: изд. ГУНиО МО РФ, 1996. – 279 с.
4. Инженерная записка № 268/3 ЦНИИ «Гидроприбор» – СПб., 1994. – 37 с.

THE FLOATING WARNING BEACON WITH INERTIA-PISTON WAVE-ACTION POWERPLANT

**M. L. Bogdanovich,
E. P. Gladskikh,
Yu. A. Glukhov,
V. A. Maksimov
(OJSC «GNINGI»)**

The variant of using the energy of sea waves in the floating beacons is considered.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПОСОБОВ РАСЧЕТА БЕЗОПАСНОЙ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ

Н. М. ГРУЗДЕВ
(СПбВМИ)

Рассматриваются два способа расчета допустимой ширины полосы движения корабля: традиционный (на основе использования коэффициента точности счисления) и способ, основанный на теории случайных выбросов. Производится сравнение этих способов. Показано, что случайные отклонения корабля относительно заданной линии пути в большинстве случаев превышает линейные отклонения корабля, рассчитанные по коэффициенту точности счисления.

Безопасность плавания кораблей по счислению по неогражденному фарватеру или в установленной полосе движения зависит главным образом от точности знания учитываемого морского течения. Эта зависимость проявляется особенно существенно при плавании с использованием только относительного лага.

При проходе фарватера (полосы) по счислению наиболее актуальной задачей является оценка вероятности невыхода корабля за пределы границ фарватера (полосы) в течение всего времени плавания по счислению.

Для решения этой задачи существует два способа:

- способ, основанный на учете случайных выбросов случайной функции изменчивости скорости морского течения;
- способ, основанный на использовании коэффициента точности счисления.

Сначала рассмотрим *первый способ* и его практическое применение. В теоретическом плане он опирается на содержание некоторых положений о выбросах случайной функции, опубликованных в работах [1, 2, 3]. Учитывая, что указанные книги в настоящее время стали библиографической редкостью (они изданы почти полвека назад), считаю необходимым вспомнить некоторые положения теории выбросов применительно к решению поставленной выше задачи – к определению допустимой ширины F полосы безопасного (с доверительной вероятностью P) плавания без корректуры счислимого места в течение заданного времени t .

Поскольку выбросы, существенно выделяющиеся на фоне других колебаний случайного процесса счисления, являются событиями редкими, то исходным пунктом теории о случайных выбросах является положение о вероятности редких событий. Событие считается редким, если оно подчиняется закону распределения Пуассона. Согласно этому закону вероятность того, что на интервале t произойдет k событий (k недопустимых выбросов) определяется формулой

$$P_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где λ – среднее число выбросов на интервале времени t .

В данном случае выставляется требование отсутствия недопустимых выбросов, поэтому величину k необходимо приравнять нулю. Тогда будем иметь

$$P_0 = P = \exp(-\lambda t).$$

Произведение λt – среднее число выбросов на интервале t . Обозначим для краткости $\lambda t = N_t$. Тогда получим

$$P = \exp(-N_t). \quad (2)$$

Пусть среднее число выбросов (в одну сторону) в единицу времени равно N_1 . Тогда среднее количество выбросов в обе стороны за время t будет равно

$$N_t = 2N_1 t. \quad (3)$$

Примем процесс недлительного счисления без учета течения приближенно квазистационарным. Известно, что для стационарного случайного процесса величина N_1 рассчитывается по формуле, обоснованной в работе [1]:

$$N_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\rho''(0)} \exp\left\{-\frac{[c - M_x]^2}{2\sigma_x^2}\right\}. \quad (4)$$

В этой формуле $\rho''(0)$ – вторая производная от нормированной корреляционной функции $\rho(\tau)$ при аргументе $\tau = 0$; c – искомая величина выброса, равная $c = 0,5 F$; M_x и σ_x – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение рассматриваемой случайной функции.

Из выражения (2) следует

$$N_t = -\ln P. \quad (5)$$

Приравнивая выражения (3) и (5), будем иметь $2N_1 t = -\ln P$.

Подставим сюда N_1 (формула 4) и примем, что корабль перемещается по осевой линии полосы ($M_x = 0$). Тогда получим

$$-\ln P = \frac{t}{\pi} \sqrt{-\rho''(0)} \exp\left(-\frac{c^2}{2\sigma_x^2}\right).$$

Решая это уравнение относительно $c = 0,5F$, после преобразований найдем гарантированную ширину полосы движения, за пределы которой корабль не выйдет в процессе плавания с заданной вероятностью P :

$$F = 2\sigma_x \sqrt{2 \ln \frac{t \sqrt{-\rho''(0)}}{\ln\left(\frac{1}{P}\right)^\pi}} \quad (6)$$

где σ_x – средняя квадратическая погрешность случайной функции морского течения, под влиянием которого происходят случайные отклонения корабля от заданной

линии пути, $\rho''(0)$ – вторая производная нормированной корреляционной функции течения, взятая в нуле, t – интервал счисления.

Если рассчитанная величина F окажется больше фактической ширины полосы безопасного плавания ($F > F_{\phi}$), то следует сократить интервал времени плавания без обсерваций или увеличить степень риска путем уменьшения заданной вероятности безопасного плавания P .

Из вида формулы (6) следует, что она может быть использована в тех случаях, когда случайный процесс характеризуется нормированной корреляционной функцией, имеющей вторую производную при аргументе $\tau = 0$. К таким функциям относится корреляционная функция морского течения [4], определяющая случайные колебания движения корабля по направлению перпендикуляра к линии пути:

$$\rho(\tau) = \exp(-\alpha|\tau|) \left[\cos \beta\tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta|\tau| \right], \quad (7)$$

где α и β – параметры случайной функции, численное значение которых для различных районов Мирового океана находится в пределах [4]: $\alpha = 0,1 \div 0,6 \text{ ч}^{-1}$, $\beta = 0,3 \div 0,7 \text{ ч}^{-1}$; τ – заданный интервал времени.

Пример.

Случайная функция точности счисления без учета течения, обусловленная изменчивостью учитываемого морского течения и случайными погрешностями средств счисления, характеризуется нормированной корреляционной функцией (7).

По условиям обстановки плавание по счислению в заданной полосе движения шириною $F_{\phi} = 5$ миль должно продолжаться $t = 8$ ч.

Определить: ширину полосы, в которой корабль с вероятностью $P = 0,95$ будет находиться на протяжении заданного интервала времени, если параметры данной нормированной корреляционной функции оцениваются следующими средними величинами: $\alpha = 0,1$ (1/ч), $\beta = 0,05$ (1/ч), $\sigma_x = 0,5$ (мили).

Решение:

– вычисляется вторая производная (в нуле) нормированной корреляционной функции (7) $\rho''(0) = -0,0125$;

– по формуле (6) рассчитывается искомая ширина полосы, в которой с вероятностью 0,95 будет находиться корабль через 8 ч плавания, $F = 3,96$ мили, что соответствует одностороннему выбросу $c = 1,98$ мили.

Так как $F < F_{\phi}$, то заданный интервал времени плавания обеспечивает (с заданной вероятностью) нахождение корабля в фактической полосе безопасного плавания.

Сущность второго способа определения вероятности безопасного положения корабля в полосе движения через интервал времени плавания по счислению t состоит в расчете погрешности места по коэффициенту точности счисления [5].

Радиальная СКП счисления вычисляется по одной из известных формул

$$M_c(t) = \begin{cases} 0,7 K_c t, & \text{при } t \leq 2\text{ч;} \\ K_c \sqrt{t}, & \text{при } t > 2\text{ч.} \end{cases} \quad (8)$$

где K_c – коэффициент точности счисления, t – интервал счисления (ч).

Поскольку формула (6) выведена по результатам исследования изменчивости морского течения по заданному направлению и учитывает доверительную вероятность ширины полосы, в которой может оказаться корабль через интервал времени t , то для последующего сравнения способов необходимо рассматривать также линейную погрешность для принятой доверительной вероятности P . Для этого используется известная из теории погрешностей [5] формула

$$\Delta_c = F_K = z_p 0,7 M_c(t), \quad (9)$$

в которой Δ_c – линейная погрешность счисления, соответствующая заданной вероятности P , F_K – допустимая ширина полосы через интервал времени t после последней обсервации, $M_c(t)$ – радиальная СКП счисления, z_p – вероятностный коэффициент, соответствующий заданной вероятности P (определяется по табл.4.7 МТ-2000).

Для сравнения допустимой ширины полосы (фарватера) сравним результаты расчетов по формулам (6) и (9), приведенные в табл. 1.

Таблица составлена для следующих исходных данных: интервалы счисления ограничены величиной $t = 4$ ч, соответствующей интервалу корреляции для случайного процесса со средними параметрами нормированной корреляционной функции (7); коэффициенты точности счисления, для которых составлена таблица, примерно соответствуют счислению без использования абсолютного лага (течение не учитывается или учитывается приближенное его значение по данным навигационных пособий). За доверительную вероятность появления выброса принята вероятность $P = 0,98$. Это же значение вероятности принято для определения величины z_p ($z_{0,98} = 2,32$), необходимой при расчете линейной погрешности (9).

Таблица 1

Интервал счисления, t , ч	F , мили (формула 6)	F_K , мили (формула 9)		
		$K_c = 1,0$	$K_c = 1,5$	$K_c = 2,0$
0,4	2,79	0,46	0,70	0,93
0,8	2,88	0,93	0,93	1,86
1,0	2,90	1,16	1,16	2,32
2,0	2,99	2,32	3,48	4,64
3,0	3,04	2,93	4,40	5,87
4,0	3,07	3,39	5,08	6,78

Рассматривая данные таблицы, можно заметить, что выбросы корабля (относительно заданной линии пути), обусловленные случайными существенными изменениями переменного течения, в большинстве рассматриваемых вариантов превышают линейные отклонения корабля, вызванные погрешностями счисления. Это означает, что ширина полосы безопасного положения корабля, рассчитанная обычным способом (по коэффициенту точности счисления) не всегда гарантирует навигационную безопасность (с заданной вероятностью) положения корабля.

Из 18 рассмотренных вариантов только в семи (в таблице они очерчены жирной линией) погрешности счисления превышают величину возможных выбросов и, следовательно, только в этих случаях можно рассчитывать на надежность традиционного способа расчета допустимой полосы движения при плавании по счислению.

При этом важно быть уверенным в надежности коэффициента точности счисления, особенно при плавании с относительным лагом. Для повышения безопасности плавания кораблей без абсолютного лага штурманской службе по-прежнему необходимы океанологические данные, определяющие вид и параметры корреляционных функций морского течения.

Эти проблемы могут быть сняты, если абсолютными лагами будут оснащены не только некоторые проекты атомных подводных лодок, но и все надводные корабли.

Среди некоторой части специалистов кораблевождения бытует мнение о том, что среднеорбитные космические системы ГЛОНАСС и GPS решают все задачи точности мореплавания. При этом не учитывается следующее важное обстоятельство: военные корабли создаются для выполнения своих многообразных функций главным образом в военное время, когда работа спутниковых систем может быть нарушена созданием радиопомех или будет ограничена по режимным соображениям. Поэтому совершенно недопустимо недооценивать надежность традиционных средств и методов морской навигации, в том числе и вопросы повышения точности и надежности безопасного плавания по счислению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов В. И. Выбросы случайного процесса. – М.: АН СССР. Успехи физико-математических наук. – Т. XXVII. – Вып. 3, июль. – 1962.
2. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Судпромгиз, 1961. – 252 с.
3. Молоканов Г. Ф. Точность и надежность навигации летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1967. – 215 с.
4. Скворцов М. И. Систематические погрешности в судовождении. – М., Транспорт, 1980. – 168 с.
5. Груздев Н. М. Математическая обработка и анализ навигационной информации. – МО РФ, СПб ВМИ, 2006. – 264 с.

COMPARATIVE ESTIMATE OF CALCULATION METHODS FOR THE SAFE TRAFFIC LANE WIDTH

N. M. Gruzdev

(Peter the Great Marine Corps – St. Petersburg Naval Institute)

Two calculation methods for the allowable ship traffic lane width are considered: the traditional method (based on the employment of the dead reckoning accuracy coefficient) and the method based on the random spikes theory, are considered. These methods are compared. It is shown that the accidental deviations of a ship relative to the set track line exceed, in most cases, the linear deviations of a ship calculated using the dead reckoning accuracy coefficient.

ГРНТИ 78.21.41.

**ОБ ОРГАНИЗАЦИИ НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРЕПЛАВАНИЯ**

**В. С. БОЛДЫРЕВ,
В. Я. ВАСИЛЬЕВ,
А. Н. ЯКОВЛЕВ**
(ЦНИИМФ)

В статье приводится анализ навигационно-гидрографического обеспечения (НГО) торгового мореплавания в современных условиях и излагаются взгляды авторов на НГО мореплавания в первых десятилетиях XXI в.

Начальник Главного управления навигации и океанографии МО России (в то время) адмирал, доктор технических наук А. А. Комарицын и Президент Гидрографического общества России капитан 1 ранга, доктор технических наук Н. Н. Неронов опубликовали в журнале «Морской сборник» № 6, 2006 год статью: «Навигационно-гидрографическое обеспечение (НГО) морской деятельности» [1], в которой изложили свои взгляды на современное состояние и перспективы развития этого важного научно-технического направления.

Уважаемые авторы совершенно справедливо указывают на многочисленные недостатки в данной области и предлагают ряд мер по улучшению сложившегося положения путем укрепления единой государственной Гидрографической службы в составе Минобороны.

Можно согласиться с тем, что при достаточном финансировании такая служба сможет надежно обеспечивать все потребности в организации НГО, в том числе и народнохозяйственной деятельности на море.

Однако практика последнего времени убедительно свидетельствует о несбыточности надежд на выделение необходимых ресурсов, что вынуждает, в частности, организации Минтранса искать самостоятельные пути активизации работ по НГО в акваториях портов и на подходах к ним.

Об актуальности рассмотренной тематики свидетельствует и то, что Морская коллегия при Правительстве Российской Федерации 20.01.2006 г. (протокол 3 1(11)) поручила Минэкономразвитию России, Минобороны России, Минтрансу России разработать предложения по оптимальной организации, порядку осуществления и исключению дублирования функций по НГО морской деятельности в Российской Федерации.

Очевидно, что указанный документ должен отражать консолидированные интересы всех заинтересованных ведомств, и его положения должны быть основаны на результатах тщательного анализа сложившейся ситуации, накопившихся здесь противоречий, а также тенденций развития средств и методов обеспечения.

По действующему Федеральному закону – «Кодексу торгового мореплавания» [2]:
– НГО морских путей, за исключением трассы Северного морского пути (СМП), осуществляют органы исполнительной власти в области обороны;

– НГО трассы СМП осуществляют органы исполнительной власти в области транспорта.

Распределение обязанностей в части организации обеспечения указано в не отмененном до настоящего времени, «Положении о навигационно-гидрографическом обеспечении ... » 1969 г. (3).

В «Приложении 1» к этому документу приводится «Список портов, каналов и других акваторий морей СССР, навигационное оборудование и гидрографическое изучение которых находится в ведении Минморфлота». Однако выполнение гидрографических работ в этих акваториях может быть поручено только производственным организациям Гидрографической службы или же государственной организации – Гидрографическому предприятию (ГП) Минморфлота, поскольку на время выхода документа, других организаций такого профиля в стране не было.

В настоящее время ГП имеет статус Федерального унитарного предприятия (ФГУП) и входит в систему Минтранса России.

Несколько лет тому назад в порядке совершенствования управления народным хозяйством в системе Минтранса России были созданы Федеральные унитарные предприятия (ФГУП) «Росморпорт», которые активно включаются в выполнение работ по НГО акваторий портов и подходов к ним.

Под термином НГО морских путей или просто мореплавания обычно понимается комплекс мероприятий по:

- изучению заданных акваторий в гидрографическом отношении с целью создания морских навигационных карт и других пособий для плавания в традиционной и цифровой формах;
- перекрытию таких акваторий рабочими зонами радионавигационных систем (РНС) космического и наземного базирования, а также визуальных береговых и плавучих средств навигационного оборудования (СНО).

Напомним, что решение первой группы задач принимает на себя Правительство России как участник Международной Конвенции (в документе Contracting Government) в соответствии с требованиями Правила 9 Главы 5 Международной Конвенции по охране человеческой жизни на море – СОЛАС-74, а решение второй – в соответствии с требованиями Правила 13 той же Главы 5 СОЛАС-74.

Существующая система организации НГО мореплавания складывалась и развивалась в нашей стране еще до разработки и принятия Конвенции СОЛАС-74, начиная с 20-х годов XX века.

В отличие от большинства Гидрографических служб (ГС) других морских стран Мира, в круг обязанностей ГС России всегда входило строительство и обеспечение функционирования средств навигационного оборудования различного назначения.

Как и многое другое в нашей стране, развитие средств и методов НГО осуществлялось в основном в интересах обеспечения обороноспособности. Но при этом в определенной мере учитывались и потребности торгового и рыбопромыслового флотов, несмотря на то, что ГС организационно входила в состав вида Вооруженных сил – Военно-Морского флота.

При плановой системе народного хозяйства сочетать интересы разных ведомств было, в принципе, вполне возможно. Разумеется, на практике случались

разного рода нестыковки, но, в целом система навигационно-гидрографического обеспечения всех видов деятельности на море, в том числе и мореплавания, работала.

Изменение системы управления в стране и революционный переход к введению рыночных отношений, с учетом обычных для нас перехлестов, привел к разрушению установившегося порядка и в данной специфической области.

Прежде решением задач НГО занимались исключительно государственные организации со строго заданной иерархией, структурой и зонами ответственности. Теперь в процессы выполнения гидрографических съемок, обработки их результатов и даже картоиздания начинают активно внедряться коммерческие организации. Защитная мера Мирового морского сообщества по ограничению коммерческого предпринимательства в части морского картпроизводства путем включения в международную Конвенцию СОЛАС-74 термина «официальная карта», которая может быть издана только уполномоченной на то государственной службой, конечно, является действенной. Однако нужно иметь в виду, что ее роль может быть ослаблена за счет лицензирования всего производства, либо его конечного продукта – то есть карты.

Объясняется коммерческий интерес тем, что современная радиоэлектроника позволяет значительно повысить производительность как съемочных, так и картоиздательских работ и сделать их рентабельными. Привлекательность же картоиздания, особенно в электронной форме, определяется устойчиво высоким спросом на конечную продукцию (морскую навигационную карту).

Следует признать, что межведомственные отношения и отношения между коммерческими структурами и государственными учреждениями гидрографического профиля все еще до конца не урегулированы.

В соответствии с уже упоминавшимися Кодексом торгового мореплавания [2] и «Положением ...» [3], ГС ВМФ РФ выполняет морские съемки в пределах территориального моря России и в международных водах Мирового Океана, а ФГУП «ГП» Минтранса – в акваториях по трассе СМП и в других водах указанных в данном «Положении ...». Такие работы производятся по единым Правилам гидрографической службы, за разработку которых отвечает ГС ВМФ. Однако издание морских навигационных карт, по крайней мере, в традиционной форме, является исключительной прерогативой ГС ВМФ и осуществляется 280 Центральным картографическим производством (ЦКП) ВМФ и его филиалом на Дальнем Востоке.

Прежде такой порядок особых возражений не вызывал, хотя, конечно, были весьма серьезные претензии, касающиеся недостаточного учета потребностей и интересов гражданских ведомств. В частности, одна из самых больших в Мире коллекций морских навигационных карт, созданная в ЦКП, и директивное указание пользователям закупать только отечественные карты, иногда, приводили к недоразумениям, поскольку карты, составленные на основе зарубежных материалов, значительно устаревали еще до момента выхода тиража.

Вынуждали мириться с монополизмом в этой области и экономические соображения. Картоиздательское оборудование было дорогим, сложным в обслуживании и требовавшим больших производственных площадей.

Сейчас множительная техника, оставаясь дорогой, становится высокопроизводительной, малогабаритной и поддающейся глубокой автоматизации. Появляется возможность печати тиража, откорректированного на день печати «по

заявкам», что сокращает непроизводительные расходы и, таким образом, увеличивает коммерческую привлекательность данного вида бизнеса.

В еще большей степени отмеченные обстоятельства проявляются в сфере производства электронных карт. Частных организаций здесь больше чем государственных, и выпускают они как «неофициальные», так и «официальные» (путем лицензирования) электронные карты.

Большие сроки производства работ, выполняемых подразделениями ГС ВМФ РФ по съемке рельефа дна и последующей обработке их результатов с целью издания морских карт, а также проблемы неотлаженного взаимодействия разных ведомств при решении общей задачи картографирования водного пространства, часто вынуждают «хозяев» прибрежных акваторий (филиалов ФГУП «Росморпорт», строительные фирмы и т. п. [4]) искать способы ускорения данного процесса за счет привлечения возможностей частного капитала.

Здесь возможны несколько вариантов выполнения таких работ:

- производственными организациями ФГУП «ГП»;
- структурными подразделениями гидрографического профиля организации «заказчика», например, ФГУП «Росморпорт»;
- частной гидрографической фирмой.

Разумеется, каждая такая организация должна иметь соответствующую лицензию.

Ожидаемое сокращение сроков получения конечного результата может быть достигнуто за счет повышения оперативности управления, по сравнению с базовым вариантом выполнения работы структурами Гидрографии МО РФ, и уменьшения времени согласования проблем, возникающих при выполнении работ.

При принятии решения по изменению действующего порядка изучения акваторий или же его сохранению нужно иметь в виду необходимость внесения поправок в действующее законодательство.

Обсуждая проблемы допуска частной инициативы в пределы монополизированной государственной области гидрографии, следует иметь в виду и проблему подготовки кадров по данному профилю.

В настоящее время подготовка инженеров-гидрографов у нас производится в двух государственных высших учебных заведениях: Военно-Морском институте – Морском корпусе Петра Великого и Государственной морской академии им. С. О. Макарова. Послевузовское образование существует только в системе ВМФ, где организованы постоянно действующие годовые курсы офицерского состава и ведется подготовка специалистов высшей квалификации в Военно-Морской академии им. Н. Г. Кузнецова. Первую ступень проходит приблизительно 30% выпускников института, а вторую около 3% – 5%.

В каждом из упомянутых учебных заведений функционируют диссертационные советы по присуждению ученых степеней кандидатов и докторов наук, а также аспирантура (адъюнктура). Кроме того, такой совет был создан и при Государственном научно-исследовательском навигационно-гидрографическом институте МО РФ (ныне ОАО «ГНИНГИ»).

Можно ожидать, что при выходе Гидрографической службы из состава ВМФ система подготовки кадров верхнего звена будет утрачена.

Однако, по нашему мнению, ожидать такого решения не следует, поскольку, деятельность ВМФ как в мирное, так и в военное время в значительно большей

степени, чем гражданские ведомства, нуждается в организации полноценного НГО. По мере развития оружия и технических средств ВМФ потребности в обеспечении только возрастают. Так, например, в журнале «Морской сборник» № 10, 2006 года, в статье «Задачи подводной навигации» академик РАН В. Г. Пешехонов сообщает, что в системы управления стрельбой стратегической подводной лодки должно поступать около 40 параметров навигационного характера. Значительная часть из них относится к геофизическим полям Земли, параметры которых должны быть изучены и соответствующим образом систематизированы, что является одной из задач ГС ВМФ.

Из этих рассуждений следует вывод о том, что в любых случаях придется считаться с необходимостью сохранения ГС и в составе ВМФ. Отмеченное обстоятельство, конечно, не исключает возможностей автономизации «гражданского сектора» Гидрографии, скажем, на базе ФГУП «ГП». Но тогда придется снова делить зоны ответственности, договариваться о разработке единых для всей страны руководящих документов по производству всего комплекса гидрографических работ, а также по выполнению исследований с целью определения перспектив развития средств и методов гидрографии.

Сейчас последние функции, хорошо или плохо, но выполняет ОАО «ГНИНГИ». В рамках Минтранса таких структур нет и нет базы для их создания, особенно с учетом необходимости подготовки кадров для подобной организации.

Заметим, что в связи с сокращением Вооруженных сил страны с января 2007 г. ГНИНГИ был переведен на гражданский штат и укомплектован в основном за счет офицеров, находящихся в отставке. Вряд ли стоит ожидать положительного эффекта от такого нововведения. Кроме того, неизбежно встанет вопрос о финансировании мероприятий по НГО. Основным источником здесь, конечно, должен быть Федеральный бюджет и деньги на организацию НГО придется делить между Минобороны и Минтрансом. Кто будет выполнять функцию «справедливого делителя» пока не вполне ясно, и этот вопрос надо, по крайней мере, обсудить. Дело осложняется тем, что отдельные направления деятельности по НГО, например, изготовление и продажа морских карт могут приносить доход.

Понятно только одно – выбор такого варианта предопределяет необходимость серьезной перестройки сложившейся управленческой и производственной структур. По опыту известно, чем это грозит.

Компромиссный подход, по нашему мнению, может быть получен путем дальнейшего расширения действующего сейчас территориального принципа разделения зон ответственности (территориальные воды и открытое море – ГС Минобороны РФ; трасса СМП и воды портов – ФГУП «ГП» по заявкам ФГУП «Росморпорт»).

В пределах второй зоны хозяйствующий субъект – ФГУП «Росморпорт» будет отвечать за выполнение всех видов работ по гидрографическому изучению и навигационному оборудованию различными видами СНО акваторий морских портов и подходов к ним.

Следует отметить, что в соответствии с неоднократно упоминавшимся «Положением о НГО» [3], такая организация обеспечения уже предусматривалась. Однако на практике здесь отмечается много нерешенных вопросов. Например, средства СНО, расположенные в одной зоне подходов к порту и даже в водах самих портов, имеющих смежные акватории с военно-морскими базами, часто находятся в

ведении разных организаций (служб «Росморпорта» и территориальных подразделений ГС МО РФ). Указанное обстоятельство приводит к взаимным претензиям и исключает возможность оптимизации системы СНО акватории, так как элементы общей системы управляются разными организациями.

Сказанное свидетельствует, скорее всего, о недостатках практики, но не самого принципа зонального разграничения.

Последовательное применение данного подхода к организации обеспечения мореплавания, по нашему мнению, позволит хозяйствующему субъекту самому распоряжаться имеющимися у него средствами и оплачивать выполнение необходимых гидрографических работ по изучению и навигационному оборудованию своей акватории без посредников. Можно ожидать, что и расходы ГС МО РФ при этом сократятся за счет уменьшения площади «зоны обслуживания».

В достаточно обширных акваториях на подходах к портам, например, для порта С.-Петербург подходы начинаются к западу от о. Готланд, все СНО могут быть переданы одному «хозяину», который сможет оптимизировать их размещение с учетом возможностей средств службы управления движением судов (СУДС). Сейчас возможности СНО и СУДС рассматриваются изолированно друг от друга, хотя в области контроля за местами и перемещением подвижных объектов, обе системы выполняют сходные функции.

Центральным вопросом обсуждаемой проблемы – организации НГО мореплавания – является обеспечение полноценного финансирования деятельности по данному направлению. При существующей структуре эта задача решается плохо из-за ограниченных возможностей Федерального бюджета и сложностей управленческого характера.

В подобных обстоятельствах обычно рекомендуется сокращать все виды расходов. Частичная модернизация принятого у нас принципа зонального деления ответственности НГО, как нам кажется, может способствовать снятию части нагрузки с Федерального бюджета за счет привлечения средств хозяйствующих субъектов (ФГУП «Росморпорт») и при этом избежать необходимости коренной ломки сложившейся структуры организации обеспечения.

При этом Гидрографическая служба страны остается единой и входящей в состав вида Вооруженных Сил – Военно-Морского флота.

Полагаем, что гипотетическая передача ГС в состав другого министерства не будет способствовать улучшению положения с финансированием обязательств Правительства страны в области обеспечения морских путей, поскольку при этом все равно сохранится вторичность функции организации НГО по отношению к основным задачам ведомства.

По мнению авторов, развитие НГО мореплавания должно осуществляться в соответствии с программно-целевой методологией, предусматривающей:

- сохранение в условиях рынка государственного управления этим видом обеспечения;
- разграничение сферы ответственности за организацию НГО между Минобороны России и Минтрансом России;
- увеличение объема гидрографических работ, связанных с обеспечением морских перевозок углеводородов по новым трассам, эксплуатацией нефтяных терминалов и морских буровых установок;

- развитие СНО в морских портах и на подходах к ним как основы интегрированных региональных систем обеспечения безопасности мореплавания, включающих подсистемы СУДС, ГНСС и ГМССБ;
- внедрение с долевыми вкладами бюджетных средств в практику гидрографических работ новых технических средств и технологий, основанных на применении многолучевых гидроакустических комплексов, высокоточных спутниковых методов определения координат и интернет-методов обработки и передачи геофизической информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комарицын А. А., Неронов Н. Н. Навигационно-гидрографическое обеспечение морской деятельности. // Морской сборник. – 2006. – № 8. – С. 16–18.
2. Федеральный закон «Кодекс торгового мореплавания», статья 5,4М. – М.: Юрайт, 2006. –135 с.
3. «Положение о навигационно-гидрографическом обеспечении плавания транспортных, промысловых, специальных и других морских и речных судов в океанах, на морях и внутренних водных путях СССР». ГУНиО МО СССР, 1969.
4. Постановление Правительства РФ от 25 сентября 2002 года, № 705.

ON ORGANIZATION OF THE NAVIGATION-HYDROGRAPHIC SUPPORT FOR SEAFARING

V. S. Boldyrev,

V. Ya. Vasilyev,

A. N. Yakovlev

(The Central Research Institute of the Marine)

The analysis of the navigation-hydrographic support (NHS) for the merchant shipping under the present-day conditions is presented merchant shipping under the present-day conditions is presented. The view of the authors concerning the NHS for the seafaring in the first decades of the XXI century are set forth.

ОБЩИЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

А. Д. ГОЛЯКОВ

(ОАО «НИИ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ»)

Рассмотрены основные положения общего подхода к проблеме обеспечения функциональной безопасности, реализованного в стандартах международной электротехнической комиссии. Приведены количественных характеристики уровней полноты безопасности.

Современные морские суда представляют собой сложные комплексы, содержащие оборудование, которое способно при возникновении отказа нанести вред здоровью находящихся на судне людей, причинить экологический или материальный ущерб. Для предотвращения опасных ситуаций, уменьшения тяжести нанесённого ущерба, защиты людей и окружающей природной среды от возникающих угроз разрабатываются системы, обеспечивающие нахождение такого оборудования в безопасном состоянии в течение времени его функционирования.

Способность систем обеспечения безопасности сохранять безопасное состояние управляемого оборудования или его системы управления получила название функциональной безопасности.

Термин «функциональная безопасность», а также общий подход к её обеспечению предложен международной электротехнической комиссией (МЭК), членом которой является Российская Федерация. Сущность общего подхода к обеспечению функциональной безопасности изложена в разработанном МЭК стандарте ГОСТ Р МЭК 61508-2007 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью»¹. Предложенная в этом стандарте методология распространяется также на системы, в которых применяются технологии, отличные от электрических и электронных, в частности, механические, гидравлические и пневматические технологии [1].

В основе общего подхода к обеспечению функциональной безопасности лежит концепция «допустимого риска»². Согласно этой концепции абсолютной безопасности не существует. Даже после принятия защитных мер, проведения соответствующих мероприятий и внедрения технических средств обеспечения безопасности остаточный риск не становится равным нулю. Безопасное состояние оборудования в условиях его функционирования достигается путем уменьшения риска до допустимого значения, определенного как допустимый риск³.

¹ На территории РФ ГОСТ Р МЭК 61508-2007 введён в действие с сентября 2008 года.

² В документах МЭК концепция «абсолютной безопасности» признана неподходящей при эксплуатации сложных систем, в том числе систем обеспечения безопасности мореплавания.

³ Допустимым риском называется такой риск, который приемлем при данных обстоятельствах на основании существующих в текущий период времени ценностей в обществе.

В соответствии с рекомендациями авторитетных международных организаций ИСО⁴ и МЭК для уменьшения риска происшествий (вероятности наступления и значения причинённого ущерба) до допустимого уровня целесообразно использовать следующую итерационную процедуру⁵ (рис. 1):

- выявить каждую угрозу возникновения происшествия, способную возникнуть на всех этапах и при всех условиях функционирования управляемого оборудования, включая монтаж (установку), эксплуатацию, ремонт и утилизацию;
- оценить риск для каждой выявленной угрозы возникновения происшествия;
- принять решение, является ли риск допустимым (приемлемым);
- если риск является недопустимым, уменьшить его до значения, которое допустимо.

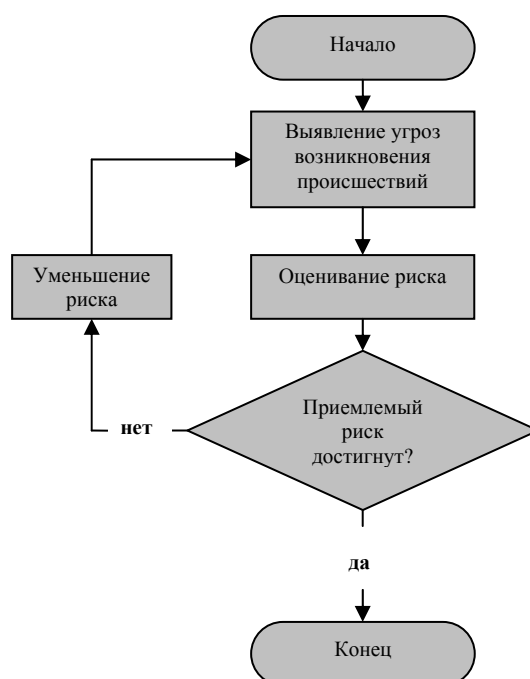


Рис. 1. Процедура уменьшения риска

Управляемое оборудование, в общем случае, может находиться в одном из двух состояний – в безопасном или опасном [2]. Переход из безопасного состояния в опасное состояние происходит при возникновении опасного события, которое в транспортной сфере называется происшествием [3]. Происшествие может возникнуть, например, при отказе системы управления корабля или морского судна.

Для достижения и поддержания безопасного состояния управляемого оборудования задаются функции безопасности. Функция безопасности – это специфическая конкретная цель и действия, обеспечивающие ее достижение и направленные на предотвращение происшествий или ограничение их последствий.

⁴ ИСО (ISO- International Standards Organization) – международная организация по стандартизации.

⁵ Руководство ИСО/МЭК 51: 1999 – Аспекты безопасности. Руководящие указания по включению их в стандарты.

Функции безопасности возлагаются на системы обеспечения безопасности⁶. Количественной характеристикой способности системы выполнять требуемые функции безопасности является полнота безопасности.

Полнота безопасности – это вероятность того, что система безопасности будет удовлетворительно выполнять требуемые функции безопасности при всех заданных условиях в течение установленного периода времени. По существу полнота безопасности является той величиной снижения риска, которую должна обеспечить система защиты относительно «широко применяемого значения» индивидуального риска 10^{-6} в год [1].

При решении задач в большинстве практических приложений, в частности при обосновании требований к системам защиты от различного рода угроз и контроля соответствия этих требований, используются дискретные уровни полноты безопасности. Стандартом ГОСТ Р МЭК 61508-2007 введён уровень безопасности SIL (Safety Integrity Level).

Уровень полноты безопасности (SIL) – дискретный уровень, принимающий одно из четырех возможных значений и определяющий требования к полноте безопасности. Уровень полноты безопасности равный 4 характеризует наибольшую полноту безопасности, уровень, равный 1, отвечает наименьшей полноте безопасности, т. е. чем выше уровень SIL, тем меньше вероятность того, что система неспособна выполнить заданную функцию безопасности.

При определении полноты безопасности учитываются все причины опасных отказов, включая случайные отказы аппаратуры, систематические отказы программных средств, а также отказы в электрическом интерфейсе. Некоторые из этих типов отказов, например, случайные отказы аппаратуры, могут быть охарактеризованы количественно, с использованием таких показателей, как интенсивность опасных отказов или вероятность того, что система обеспечения безопасности не сможет выполнить заданную функцию безопасности в течение установленного времени.

Другие типы отказов, в частности, отказы, обусловленные ошибками в программном обеспечении, могут быть оценены с помощью качественных показателей. Однако, несмотря на присутствие принципиальной разности между видами показателей аппаратных и программных средств, в технологии общего подхода оценивается полнота безопасности всего аппаратно-программного комплекса.

Уровни полноты безопасности определены для двух режимов работы системы обеспечения безопасности. Под режимом работы понимается способ предполагаемого использования системы по отношению к частоте обращения к ней, т. е. по отношению к частоте угроз возникновения опасного события, например, частоте отказов системы управления движением судна.

Режимы работы систем обеспечения безопасности получили следующие названия:

– режим с низкой частотой обращения к системе (т. е. режим, при котором угрозы безопасному состоянию управляемого оборудования возникают с частотой, не превышающей одного раза в год);

⁶ Системы обеспечения безопасности в ГОСТ Р МЭК 61508– 2007 называются «системами, связанными с безопасностью».

– режим с высокой частотой обращения к системе или непрерывный режим (т. е. режим, при котором угрозы безопасному состоянию управляемого оборудования возникают с частотой, превышающей один раз в год).

В зависимости от режима работы системы уровни полноты безопасности имеют различные показатели. Если система работает в режиме с низкой частотой обращения, то полнота её безопасности характеризуется средней вероятностью отказа выполнения функции безопасности в год (т.е. средней вероятностью опасного отказа в год).

Если система работает в режиме с высокой частотой обращения или в непрерывном режиме, то полнота её безопасности характеризуется частотой выполнения функции безопасности в час (т. е. частотой опасного отказа в час). Численные значения уровней полноты безопасности приведены в таблице.

Согласно методологии общего подхода к функциональной безопасности показатели, соответствующие SIL 4, представляют предел, который может быть достигнут в настоящее время. К системам обеспечения безопасности, имеющим SIL 4, предъявляются повышенные требования (значительный опыт эксплуатации комплектующих элементов, достаточно большой объём данных по отказам и т. п.). К уровню полноты безопасности электрических и электронных систем обеспечения безопасности не могут предъявляться требования более жёсткие, чем те, которые указаны в таблице применительно к SIL 4, например, не рекомендуется устанавливать вероятность опасного отказа системы равную 10^{-6} за один год в течение назначенного срока.

Уровни полноты безопасности систем

SIL	Режим низкой частоты обращений к системе обеспечения безопасности (вероятность отказа системы выполнить функции безопасности в течение одного года)	Режим высокой частоты обращений к системе безопасности или режим непрерывной работы (частота отказа системы выполнить функции безопасности в час)
4	$\geq 10^{-5} - < 10^{-4}$	$\geq 10^{-9} - < 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-4} - < 10^{-3}$	$\geq 10^{-8} - < 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-3} - < 10^{-2}$	$\geq 10^{-7} - < 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-2} - < 10^{-1}$	$\geq 10^{-6} - < 10^{-5}$

Система может выполнять несколько функций безопасности с различными уровнями SIL. В этом случае те компоненты аппаратного и программного обеспечения, для которых не установлена достаточная степень независимости, относятся к функциям с наивысшим уровнем полноты безопасности.

По аналогии с общим подходом в руководящих документах Ассоциации морских операторов Великобритании (УКООА) также введены уровни полноты безопасности. Однако количество уровней не превышает трёх, поскольку уровень SIL 4 не рекомендован к использованию. При этом для выбора уровня полноты безопасности руководство УКООА для морских, нефтяных и газовых разработок рекомендует применять так называемый граф рисков [1], представленный на рис. 2.

Серьёзность последствий	Пребывание персонала	Возможность предотвратить угрозу	Частота угроз		
			Относительно высокая	Низкая	Очень низкая
Лёгкое повреждение			—	—	—
			1	—	—
Серьёзное повреждение или гибель одного человека	Редкое	Возможное	2	1	—
		Неправдоподобное	2	1	1
	Частое	Возможное	3	2	1
		Неправдоподобное	3	3	2
Многочисленные жертвы	Редкое		NR	3	3
	Частое		NR	NR	NR
Катастрофические последствия			NR	NR	NR

Рис. 2. Граф рисков, рекомендуемый УКООА:

«←» – специальные меры безопасности не требуются;

NR – меры безопасности не рекомендуются, рассмотреть альтернативные решения

При использовании графа рисков полагается, что «относительно высокая частота угроз» происходит в случае, когда потребность выполнения заданных функций системой обеспечения безопасности возникает не менее трёх раз в год, «низкая» – 0,3 раза в год и «очень низкая» – 0,03 раза в год.

Очевидными достоинствами такого подхода к заданию уровней полноты безопасности являются его простота и наглядность. Однако неоднозначность терминов «редкое» и «частое» пребывания персонала в зоне повышенной опасности, а также проблемы, возникающие при определении способности аппаратных и программных средств системы обеспечения безопасности предотвратить возникающие угрозы, свидетельствуют о сравнительно низкой точности решения задачи установления уровней полноты безопасности.

Задача достижения требуемого уровня функциональной безопасности, т. е. задача управления безопасностью, решается на каждой стадии жизненного цикла системы

обеспечения безопасности. Для решения этой задачи устанавливаются типы процессов управления и требований к ним. Тип процессов управления определяется той организацией, подразделением или отдельными специалистами, которые несут ответственность за одну или несколько стадий жизненного цикла системы обеспечения безопасности в целом, аппаратного или программного обеспечения, включая стадию эксплуатации.

К процессам управления функциональной безопасностью относятся:

- разработка политики и стратегии достижения требуемого уровня функциональной безопасности, а также средства для его оценки;
- разработка структуры документации и степени достаточности документируемой информации;
- обоснование мер и методов, используемых для решения задач, стоящих на конкретных стадиях жизненного цикла;
- оценка функциональной безопасности;
- разработка процедур, обеспечивающих компетентность всех сторон, участвующих в процессах жизненного цикла, в частности:
 - подготовка разработчиков, конструкторов, технологов, испытателей и рабочих;
 - подготовка эксплуатационного персонала;
 - периодическая переподготовка персонала;
- разработка процедур, обеспечивающих анализ угроз происшествий и выработку рекомендаций по минимизации возможности их повторения;
- разработка требований к периодическому аудиту функциональной безопасности, включая:
 - частоту проведения;
 - анализ уровня независимости сторон, отвечающих за аудит;
- разработка процедуры модификации системы обеспечения безопасности, а также процедуры утверждения и полномочия для проведения модификации.

Результат реализации перечисленных процессов функциональной безопасностью контролируется заинтересованными организациями. К предприятиям, предоставляющим продукты или услуги организациям, несущим общую ответственность за одну или несколько стадий жизненного цикла системы обеспечения безопасности, предъявляется требование, которое заключается в применении соответствующей системы управления качеством.

В статье приведены основные положения общего подхода к обеспечению функциональной безопасности, который реализуется в настоящее время во многих странах мира. Этот подход, основанный на концепции допустимого риска, устанавливает:

- соответствующую организацию процессов разработки, изготовления и эксплуатации систем обеспечения безопасности в зависимости от требуемого уровня полноты безопасности;
- рекомендации и меры, направленные на достижение требуемого уровня полноты безопасности;
- способы количественного и качественного оценивания уровня полноты безопасности аппаратных и программных средств;

– состав документируемой информации на всех стадиях жизненного цикла системы обеспечения безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смит Д. Д., Симпсон К. Д. Функциональная безопасность. Простое руководство по применению стандарта МЭК 61508 и связанных с ним стандартов. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2004. – 208 с.
2. Белов В. П., Голяков А. Д. Терминологическая база теории безопасности // Стандарты и качество, № 9, 2004, С. 48–51.
3. Антонов Ю. В., Белов В. П., Голяков А. Д. и др. Надёжность и безопасность информационно-управляющих систем (методы оценивания и контроля). – СПб.: ОАО «НИИ ТМ», 2004. – 326 с.

GENERAL APPROACH TO PROVISION OF FUNCTIONAL SAFETY

A. D. Golyakov.

(«Research Institute of Fine Mechanics» JSC)

The main provisions of the general approach to the problem of providing the functional safety that is implemented using the standards of the International Electrotechnical Commission, are considered. The quantitative characteristics of the safety completeness levels are presented.

ГРНТИ 28.27.27

МЕТОДИКА АДДИТИВНОЙ ОЦЕНКИ ДОЛИ ОТКАЗОВ ПО ОБЩИМ ПРИЧИНАМ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ СИСТЕМ НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРЕПЛАВАНИЯ

А. Д. ГОЛЯКОВ,

С. Я. СТАРКОВ

(ОАО «НИИ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ»)

Рассмотрены основные источники возникновения отказов по общей причине и приведена методика оценки доли таких отказов при определении показателей безотказности систем навигационно-гидрографического обеспечения мореплавания.

Точность оценки безотказности систем навигационно-гидрографического обеспечения (НГО) мореплавания [1], предназначенных для охраны человеческой жизни на море, снижения аварийности судов и предотвращения угроз в сфере экологической безопасности, во многом определяется составом факторов, которые учитываются при проведении расчётов, а также принятыми допущениями и гипотезами. Одна из таких гипотез базируется на предположении о независимости отказов, которые происходят в системах НГО в случайные моменты времени.

Эффективным способом борьбы с такими отказами является применение многоканальных структур построения систем, поскольку вероятность таких отказов, одновременно возникающих в параллельных каналах, низка по сравнению с вероятностью отказа одного канала. Причём эта вероятность может быть рассчитана с помощью хорошо обоснованных методик [2].

Однако в современных и перспективных системах НГО существуют определённые связи как между аппаратными компонентами, так и между программными средствами, которые приводят к появлению зависимых отказов. При этом могут возникать события, которые в течение небольшого интервала времени приводят к прекращению способности многоканальных систем выполнять заданные функции.

Возникновение подобных событий обусловлено наличием общей причины, которая вызывает одновременный отказ всех каналов системы НГО. Поэтому в научно-технической литературе, посвящённой решению этой проблемы [3–5], и международных нормативно-технических документах [6] этот тип отказов получил название «отказов по общей причине» (ООП).

Появление отказов по общей причине обусловлено рядом обстоятельств, которые возникают на соответствующих этапах жизненного цикла системы. В частности, причинами ООП являются:

1. на этапе разработки:

- использован общий источник питания для всех каналов системы;
- средства измерений одной физической величины построены на одном принципе;
- отсутствуют средства борьбы с электромагнитными помехами;
- во всех каналах системы реализовано одинаковое программное обеспечение и т. п.;

2. на этапе производства:

- во всех каналах системы использованы компоненты из одной партии;
- происходят систематические нарушения установленного технологического процесса и т. п.;

3. на этапе эксплуатации:

- обслуживающим персоналом допускаются ошибки в связи с низким качеством его обучения или отсутствием контроля знаний и навыков;
- испытательное оборудование содержит систематические погрешности;
- отсутствуют средства измерений параметров окружающей среды и т. п.

Для учёта влияния отказов по общей причине на показатели безотказности находят применение различные математические модели, сравнительный анализ которых приведён в работе [3]. В настоящее время широкое применение для оценочных расчётов [4] получила так называемая доленая БЕТА-модель [5, 6].

Основой этой модели является гипотеза о линейной зависимости интенсивностей отказов по общей причине и интенсивностей случайных независимых отказов одного из каналов системы. В соответствии с этой гипотезой отказы по общей причине происходят с интенсивностью, которая определяется из выражения

$$\lambda^{\text{ООП}} = \beta \cdot \lambda, \quad (1)$$

где $\lambda^{\text{ООП}}$ – интенсивность отказов по общей причине;

β – коэффициент отказов по общей причине;

λ – интенсивность случайных независимых отказов одного из каналов системы.

Коэффициент отказов по общей причине β , входящий в модель (1), содержит ряд частных коэффициентов. Каждый из частных коэффициентов характеризует вклад, который вносит соответствующий фактор в суммарную интенсивность ООП. При этом учитывается специфика отказов, которые обнаруживаются или не обнаруживаются системой диагностики, а также тип оцениваемого оборудования, в частности, программируемая электроника или непрограммируемая аппаратура, например, датчики или оконечные элементы.

В связи с этим, долевая БЭТА-модель представляет собой сумму двух слагаемых:

$$\lambda^{\text{ООП}} = \beta_U \cdot \lambda_U + \beta_D \cdot \lambda_D, \quad (2)$$

где β_U – коэффициент необнаруживаемых отказов по общей причине;

λ_U – интенсивность необнаруживаемых отказов одного канала;

β_D – коэффициент обнаруживаемых отказов по общей причине;

λ_D – интенсивность обнаруживаемых отказов одного канала.

Очевидно, что при отсутствии системы диагностики в аппаратуре НГО ($\lambda_D = 0$) коэффициент необнаруживаемых отказов по общей причине β_U становится равным коэффициенту отказов по общей причине β . При этом значения коэффициента β_U рассчитываются независимо от типа оборудования.

С целью снижения интенсивности отказов по общей причине, на всех этапах жизненного цикла системы НГО разрабатываются соответствующие мероприятия. Следствием реализации этих мероприятий является уменьшение значений коэффициентов отказов по общей причине β_U и β_D , используемых при оценке интенсивности отказов системы.

Вся совокупность рекомендуемых в ГОСТ Р МЭК 61508 [6] мероприятий разделена на восемь групп, каждая из которых характеризует определённый способ защиты от ООП. К этим способам, в частности, относятся физическое разделение каналов, внедрение принципа диверсификации, использование накопленного опыта создания систем, управление процессом совершенствования системы при обнаружении ООП, повышение уровня квалификации разработчиков и изготовителей системы, а также обслуживающего персонала и т. п.

Мероприятия, направленные на снижение возможности возникновения ООП, записаны в форме опросного листа и сведены в таблицу, которая приведена в ГОСТ Р МЭК [6]. В этой таблице, наряду с вопросами, приведены также значения параметров, которые характеризуют вклад каждого из мероприятий в решение задачи уменьшения коэффициентов β_U и β_D . Процедура анализа влияния датчиков и концевые элементы отличается от процедуры анализа программируемой логической электроники. Поэтому в таблице [6] используются различные столбцы для программируемых электронных средств и для датчиков или концевых элементов.

Структура перечня рекомендованных стандартом мероприятий и соответствующие значения баллов при их выполнении представлены в табл. 1, которая является фрагментом таблицы, приведённой в [6].

Вклад перечисленных мероприятий оценивается баллами X_{LS} и Y_{LS} для логической подсистемы или X_{SF} и Y_{SF} для датчиков или концевых элементов. Искомые коэффициенты β_{LU} , β_{LD} и β_{FU} , β_{FD} определяются с помощью параметров S_{LU} , S_{LD} и S_{FU} , S_{FD} соответственно.

Таблица 1

Перечень мероприятий и соответствующие им баллы

Мероприятие	Логическая электроника		Датчики и оконечные элементы	
	X_{LS}	Y_{LS}	X_{SF}	Y_{SF}
Расположены ли раздельно сигнальные кабели каналов в различных местах?	1,5	1,5	1,0	2,0
Расположены ли каналы логической подсистемы на отдельных печатных платах?	3,0	1,0		
Если датчики или оконечные элементы включают собственную управляющую электронику, то расположена ли электроника для каждого канала на отдельной печатной плате?			2,5	1,5
Реализованы ли в каналах различные технологии, например, один канал – непрограммируемый электронный, а другой – программируемый электронный?	5,0			
Использованы датчики на различных физических принципах?			7,5	
Реализованы ли в устройствах различные электрические и физические принципы, например, использованы компоненты от различных производителей или с различной технологией?			5,5	
Были ли каналы разработаны независимыми конструкторами?	1,0	1,0		
Все ли сигнальные и силовые кабели отделены друг от друга?	2,0	1,0	2,0	1,0
Защищены ли входы и выходы от возможного превышения допустимых значений напряжения и тока?	1,5	0,5	1,5	0,5

Значения параметров S_{LU} и S_{FU} , характеризующих коэффициенты необнаруживаемых отказов по общей причине (β_{LU} и β_{FU}) рассчитывается путём сложения баллов:

$$S_{LU} = X_L + Y_L,$$

$$S_{FU} = X_F + Y_F,$$

где параметры X_L , Y_L , X_F и Y_F представляют собой суммы соответствующих баллов, которые приведены в каждом из столбцов X_{LS} и Y_{LS} для логической подсистемы или X_{SF} и Y_{SF} для датчиков или концевых элементов, т. е.

$$X_L = \sum X_{LS}, Y_L = \sum Y_{LS}, X_F = \sum X_{FS}, Y_F = \sum Y_{FS}.$$

Для расчёта параметров S_{LD} и S_{FD} , характеризующих коэффициенты обнаруживаемых отказов по общей причине (β_{LD} и β_{FD}), наряду со значениями X_L , Y_L , X_F и Y_F , оцениваются коэффициенты Z_L и Z_F , которые зависят от частоты и глубины диагностики системы. При этом частота диагностики определяется периодом диагностического тестирования, который разделён на три или четыре интервала.

Продолжительность диагностических интервалов определяется типом оборудования. Для программируемой электроники используются три интервала:

- 1) менее одной минуты;
- 2) от одной минуты до пяти минут;
- 3) более пяти минут,

а для датчиков или конечных элементов – четыре интервала:

- 1) менее двух часов;
- 2) от двух часов до двух дней;
- 3) от двух дней до одной недели;
- 4) более одной недели.

Глубина диагностики d определяется как дробь, в числителе которой находится количество отказов, обнаруживаемых системой диагностики, а в знаменателе – общее количество отказов системы. Глубина диагностики выражается в процентах и подразделяется на три интервала:

- 1) $d \geq 99\%$;
- 2) $90\% \leq d < 99\%$;
- 3) $60\% \leq d < 90\%$.

Значения коэффициентов Z_L и Z_F применительно к программируемой электронике и датчикам или конечным элементам приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Значение коэффициента Z_L (программируемая электроника)

Глубина диагностики	Периодичность диагностического тестирования		
	Менее 1 мин.	Между 1 мин. и 5 мин.	Больше 5 мин.
$d \geq 99\%$	2,0	1,0	0
$90\% \leq d < 99\%$	1,5	0,5	0
$60\% \leq d < 90\%$	1,0	0	0

Таблица 3

Значение коэффициента Z_F (датчики или конечные элементы)

Глубина диагностики	Периодичность диагностического тестирования			
	Менее двух часов	От двух часов до двух дней	От двух дней до одной недели	Больше одной недели
$d \geq 99\%$	2,0	1,5	1,0	0
$90\% \leq d < 99\%$	1,5	1,0	0,5	0
$60\% \leq d < 90\%$	1,0	0,5	0	0

Расчёт параметров S_{LD} и S_{FD} производится по формулам:

$$S_{LD} = X_L (Z_L + 1) + Y_L, S_{FD} = X_F (Z_F + 1) + Y_F \quad (3)$$

Для определения коэффициентов β_{LU} , β_{LD} и β_{FU} , β_{FD} используется табл. 4, в которой искомые коэффициенты находятся из диапазона от 0,5% до 10% в зависимости от значений параметров S_{LD} и S_{FD} .

Таблица 4

Коэффициенты обнаруживаемых и необнаруживаемых отказов по общей причине
(программируемая электроника, датчики и оконечные элементы)

Параметры S_{LD} и S_{FD}	Программируемая электроника	Датчики или оконечные элементы
	β_{LU} и β_{LD}	β_{FU} и β_{FD}
Более 120	0,5 %	1 %
от 70 до 120	1 %	2%
от 45 до 70	2%	5%
Менее 45	5%	10%

Пример. Система НГО содержит два датчика и два блока программируемой электроники, которые включены по дублированной схеме.

Глубина диагностики компонентов системы равна $d = 95\%$, период диагностирования составляет для датчиков 90 с, а для программируемой электроники – 30 с. Все комплектующие элементы разработаны и изготовлены по одинаковым технологиям. Интенсивности отказов датчика и блока электроники соответственно равны $\lambda_F = 10^{-4}$ 1/ч и $\lambda_L = 10^{-5}$ 1/ч.

Требуется оценить вероятность безотказной работы системы в течение 100 часов с учётом возможности возникновения отказов по общей причине. Схема расчёта надёжности системы приведена на рис. 1.

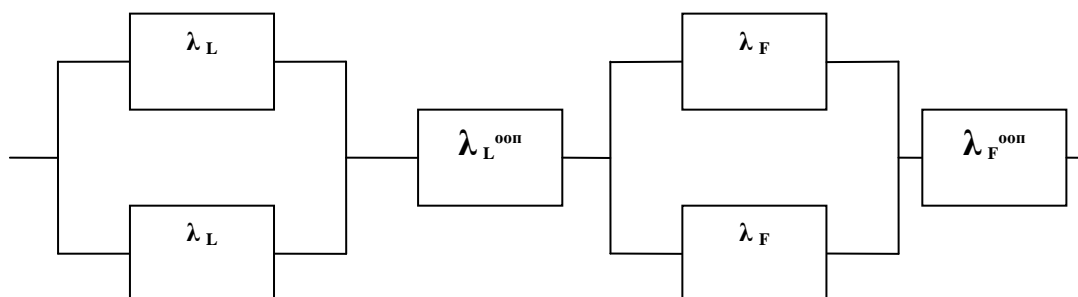


Рис. 1. Схема расчёта надёжности системы

На основании ответов на вопросы о проведенных мероприятиях, обеспечивающих снижение возможности возникновения ООП [6], рассчитаны суммарные значения баллов применительно к блоку электроники: $X_L = 27,0$; $Y_L = 23,5$ и датчику: $X_F = 32,5$ и $Y_F = 24,5$.

На основании полученных данных в соответствии с табл. 2, 3 находим коэффициенты, которые учитывают эффективность системы диагностики при решении задачи обнаружения и локализации ООП: $Z_L = Z_F = 1,5$.

С помощью выражений (3) рассчитываем параметры, необходимые для определения бета-факторов, которые используются в математической модели (2):

$$S_{LU} = 27,0 + 32,5 = 59,5 ;$$

$$S_{FU} = 32,5 + 24,5 = 57,0 ;$$

$$S_{LD} = 27,0(1,5 + 1) + 23,5 = 91,0 ;$$

$$S_{FD} = 32,5(1,5 + 1) + 24,5 = 105,75 .$$

Коэффициенты обнаруживаемых и необнаруживаемых отказов по общей причине в соответствии с таблицей 4 принимают значения:

$$\beta_{LU} = 0,02 ; \beta_{LD} = 0,01 ; \beta_{FU} = 0,05 ; \beta_{FD} = 0,02 .$$

На основании долевой БЕТА-модели и полученных значений коэффициентов определяем интенсивности отказов по общей причине блока электроники $\lambda_L^{ООП}$ и датчика $\lambda_F^{ООП}$:

$$\lambda_L^{ООП} = \beta_{LU} \cdot \lambda_{LU} + \beta_{LD} \cdot \lambda_{LD} = 0,02 \cdot \lambda_{LU} + 0,01 \cdot \lambda_{LD} = (0,0010 + 0,0095)\lambda_L = 0,0105 \cdot \lambda_L ;$$

$$\lambda_F^{ООП} = \beta_{FU} \cdot \lambda_{FU} + \beta_{FD} \cdot \lambda_{FD} = 0,05 \cdot \lambda_{FU} + 0,02 \cdot \lambda_{FD} = (0,0025 + 0,0190)\lambda_F = 0,0215 \cdot \lambda_F .$$

Откуда искомые значения интенсивностей отказов равны:

$$\lambda_L^{ООП} = 0,105 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}; \lambda_F^{ООП} = 2,15 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

Вероятность безотказной работы системы с учётом возможности возникновения отказов по общей причине находим по формуле

$$P^{ООП}(t) = [1 - (1 - P_F(t))^2] P_F^{ООП}(t) [1 - (1 - P_L(t))^2] P_L^{ООП}(t), \quad (4)$$

где $P_F(t)$ и $P_L(t)$ – вероятности безотказной работы датчика и блока электроники соответственно;

$P_F^{ООП}(t)$ и $P_L^{ООП}(t)$ – вероятности того, что в течение времени t отсутствуют отказы по общей причине датчика и блока электроники соответственно.

Поскольку справедливы приближённые соотношения

$$P_F(t) \approx 1 - \lambda_F t, \quad P_L(t) \approx 1 - \lambda_L t, \quad P_F^{ООП}(t) \approx 1 - \lambda_F^{ООП} t, \quad P_L^{ООП}(t) \approx 1 - \lambda_L^{ООП} t,$$

выражение (4) принимает вид

$$P^{ООП}(t) = [1 - (\lambda_F t)^2] (1 - \lambda_F^{ООП} t) [1 - (\lambda_L t)^2] (1 - \lambda_L^{ООП} t).$$

Откуда вероятности безотказной работы системы НГО равна $P^{ООП}(t) = 0,98958$.

Рассмотренная методика не свободна от недостатков, однако с её помощью существует возможность провести сравнительную оценку конкурирующих систем, а также предложить разрабатывающим предприятиям и эксплуатирующим организациям конкретные пути, направленные на дальнейшее совершенствование системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комарицын А. А., Алексеев С. П. Навигационная гидрография и навигационная безопасность. – http://www.transport.ru/2_period/mflot/97-1/7.htm.
2. Антонов Ю. В., Белов В. П., Голяков А. Д. и др. Надёжность и безопасность информационно-управляющих систем (методы оценивания и контроля). – СПб.: ОАО «НИИ ТМ», 2004. – 326 с.
3. Петров А. С., Ершов Г. А., Калинин А. И., Калинин А. А. Учет отказов по общей причине при оценке надежности и безопасности корабельной техники // Морская радиоэлектроника. – №2 (24). – 2008. – <http://mr.shipbuilding.ru>
4. Аронов И. З. Анализ зависимых отказов – важный способ обеспечения безопасности сложных систем // Методы менеджмента качества, №10, 2004. – <http://www.stq.ru/mmqa/detail.php?ID=7725>.
5. Смит Д. Д., Симпсон К. Д. Функциональная безопасность. Простое руководство по применению стандарта МЭК 61508 и связанных с ним стандартов. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2004. – 208 с.
6. ГОСТ Р МЭК 61508-2007. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью.

TECHNIQUE OF THE ADDITIVE ESTIMATION OF A SHARE OF REFUSALS DUE TO GENERAL CAUSES WHEN DEFINING THE RELIABILITY PARAMETERS OF NAVIGATION-HYDROGRAPHIC SUPPORT SYSTEMS FOR SEAFARING

A. D. Golyakov,

S. Ya. Starkov

(«Research Institute of Fine Mechanics» JSC)

The basic sources of occurrence of refusals due to general causes are considered. The technique used to estimate of a share of such refusals when determining of the parameters of failure-free operation of navigation-hydrographic support systems for seafaring is presented. The example of estimation of non-failure operation parameter of the system is given.

**О ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ГРАВИГРАДИЕНТОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ С ЦЕЛЬЮ
ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ОПАСНОСТИ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ
МОРСКИХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ**

Г. Б. ВОЛЬФСОН
(ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»),
П. И. МАЛЕЕВ
(ОАО ГНИНГИ)

Рассмотрены актуальность оперативного прогноза землетрясений для морских участков нефтегазовых и других трубопроводов, тектоника районов, где планируется или ведется их строительство, а также величины ожидаемых ударных воздействий в районах эпицентров землетрясений. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований показана возможность оперативного (за 1–1,5 суток) прогнозирования землетрясений при использовании гравиградиентометрической аппаратуры. В разработке такой аппаратуры в Российской Федерации имеется значительный научно-технический задел, полученный при создании корабельных средств измерения уклонения отвесной линии на морских акваториях.

Морские участки трубопроводов имеют повышенную уязвимость к сейсмическим воздействиям. Каждый факт происшедшего землетрясения ведет к увеличению вероятности их структурных нарушений: изменения геометрических параметров, положения трубопровода, возникновении аварийных ситуаций и т. п. В силу специфики этих объектов любая из этих коллизий может иметь тяжелые технические, экономические и экологические последствия, в том числе и катастрофического характера. Для магистральных подводных трубопроводов риски опасных последствий в результате сейсмических воздействий особенно высоки еще и потому, что при прокладке трубопровода часто нет свободы выбора географии строительства, поскольку (как в частности в случае газопроводов) жестко заданы координаты месторождения, терминалов и потребителя.

Хотя при строительстве газопровода принимаются меры по обеспечению запаса прочности, высокое давление газа (200 атм), создаваемое для его перекачки, определяет напряженность конструкции, которая при ударной волне вследствие землетрясения с эпицентром вблизи трубопровода не гарантирует его от повреждения или разрушения. Размер экономического ущерба и вреда экологической среды при этом часто не поддается оценке, особенно если аварийная ситуация возникает на морском участке трубопровода. Опасности повреждения сооружений комплекса усугубляются и рисками для жизни людей.

Следует заметить, что в конце XX и начале XXI веков в мире фиксируется активизация сейсмических процессов. Об этом свидетельствуют разрушительные землетрясения в Японии (1995 г.), Турции (1999 г.), Иране (2004 г.), Суматранское (2005 г.) землетрясение, вызвавшее цунами, в Китае (май 2008 г.), и другие, которые

привели к огромному числу жертв (более 1000000 человек) и большим материальным потерям (ущерб составил сотни млрд. долларов.). На ликвидацию только последствий катастрофического Сычуаньского землетрясения правительством КНР запланировано в течение 2009 г. выделить 147 млрд. долларов). Ни один из этих катаклизмов предсказан не был. Сегодня человечество не больше защищено от землетрясений, чем во времена крымского землетрясения 1927 г. или спитакского 1988 г. Характерно, что практически всегда землетрясения происходят неожиданно, чем усугубляются масштабы жертв и экономических потерь.

Снизить размеры экономического ущерба и, главное, избежать человеческих жертв возможно в случае оперативного предупреждения о готовящемся катаклизме, так как это позволит принять своевременные меры (эвакуировать людей, снизить давление газа в трубопроводе, приостановить работу атомной станции, механизмов и т. п.), и обеспечить снижение экономических потерь. Например, снижение давления в магистральном трубопроводе позволит не только минимизировать при возможном повреждении или разрыве трубы потери товарного продукта, а также масштабы экологического ущерба, но и уменьшить объем потенциальных технических повреждений, так как при снижении давления снимается напряженность конструкции трубопровода, и повышается порог допустимых дополнительных нагрузок от сейсмического удара (без структурных повреждений), а в случае превышения данного порога механические повреждения трубы не будут сопровождаться прорывом продукта при высоком давлении. При этом даже излишне говорить о резко возрастающих шансах избежать человеческих жертв среди персонала объектов в районе угрозы.

Современная сейсмология с этим не справляется, о чем свидетельствуют последствия сильных землетрясений, происходящих на планете почти каждую неделю. Несмотря на функционирование тысяч сейсмических станций, находящихся в разных странах и объединенных в единые сети, за всю историю цивилизации не известно ни одного оперативного предупреждения о приближающейся катастрофе.

Одной из причин этого являются ограниченные возможности стандартной аппаратуры, которой оснащены сейсмические станции, так как она способна фиксировать лишь факт совершившегося события, однако прогностическая задача при этом остается нерешенной. Приборы, пригодные для решения этой задачи, в настоящее время не производятся.

Использование для оперативного прогноза ряда предвестников (а их всего около 300), в том числе таких, как «особое» свечение в атмосфере, эволюции геомагнитного поля, возмущения электрических полей, необычное поведение животных и рыб и т. п., неэффективно вследствие того, что это косвенные признаки предстоящего катаклизма. Теоретические соображения и имеющиеся экспериментальные данные однозначно указывают на то, что прямые признаки следует искать среди механических процессов. В настоящее время установлено, что и в процессах подготовки (созидания) и в процессах реализации (разрушения) очагов землетрясений определяющими являются деформационные (механические) процессы, и поэтому прямые признаки следует искать именно среди них.

До настоящего времени оперативный прогноз землетрясений был практически невозможен, однако успехи теоретических и экспериментальных работ последних десятилетий позволяют утверждать, что эта проблема имеет положительное решение [1, 2]. Оно может быть достигнуто благодаря использованию методов гравитационной градиентометрии, которые раньше в сейсмологии не применялись, и

значительному научно-техническому заделу, созданному при разработках различных моделей бортовых и наземных гравитационных вариометров (ГВ), предназначенных для определения компонент тензора вторых производных гравитационного потенциала [3–6].

Гравитационные вариометры строятся по схеме крутильных весов Кулона 1-го рода, способных реагировать на воздействия вибраций основания [2]. Реакция прибора при этом проявляется в форме крутящего момента вокруг его оси чувствительности – это так называемый гантельный эффект [2]. Теоретические исследования механики ГВ в интересах сейсмологии показали, что его выходной сигнал как отклик прибора на колебания основания зависит от их интенсивности, частоты и обладает диаграммой направленности подобно направленной антенне. Благодаря этому эффекту приборы, ранее обычно применявшиеся в геологоразведке, геодезии и для физических экспериментов, способны выполнять несвойственные для них функции, превращаясь в сейсмическую антенну или градиентометрический сейсмоприемник. Результаты исследований последних лет позволили объяснить природу отклика гравитационного вариометра на прогностические признаки и разработать алгоритмию обработки сигналов приборов для получения оперативной информации о месте и интенсивности предстоящего катаклизма [2, 7].

Важно отметить, что основные теоретические и экспериментальные работы проводились в 1980–90 гг., когда научные интересы отечественных ученых охватывали сейсмоактивные регионы Средней Азии и Кавказа, где разрушительные и катастрофические землетрясения происходили особенно часто (Ашхабад – 1946 г., Ташкент – 1966 г., Спитак – 1988 г.), и не могли быть оставлены без внимания. Однако после распада СССР интенсивность исследований существенно снизилась. Видимо, это объясняется и тем, что в Москве сильное землетрясение имело место относительно давно – около 500 лет назад при Иване III, когда город был разрушен и полностью сгорел. Из факта сильного землетрясения на Сахалине в 1995 г., когда погибли тысячи жителей разрушенного Нефтегорска, практических выводов не сделано.

В настоящее время существует угроза утраты накопленного в течение десятилетий научно-технического задела, который оказался невостребованным, хотя на создание его были затрачены значительные средства.

Следует отметить высокую культуру исполнения уникальной экспериментальной установки ИФЗ, с помощью которой были впервые получены положительные результаты для решения прогностической проблемы, однако ее изготовление в промышленных масштабах в настоящее время представляется весьма проблематичным. Это объясняется устаревшей элементной базой типа торсионного подвеса коромысла (приборы начала прошлого века) и отсутствием производственной инфраструктуры, поскольку серийное производство таких приборов для целей геологоразведки прекращено около сорока лет назад. Это же относится и к моделям гравитационных вариометров, установленных на сейсмических станциях Казахстана.

Задача может быть решена путем использования технологий современного прецизионного приборостроения, в частности, – научно-технических разработок ЦНИИ «Электроприбор» в результате исследований по тематике морской градиентометрии [8]. Современные технологии, применяемые в производстве чувствительных элементов гравиинерциальной аппаратуры для подвижных объектов, позволяют решить задачу

создания гравиградиентометрического сейсмоприемника с характеристиками, обеспечивающими прием прогностических сигналов при расстоянии от источника до нескольких тысяч километров с определением места зарождающегося землетрясения и его интенсивности за 1–1,5 суток до события [8].

Представляется, что даже одно предупреждение о сейсмической опасности, позволяющее принять превентивные меры для снижения разрушительного эффекта землетрясения вблизи трассы трубопровода, окупит все затраты на создание рассматриваемой системы оперативного прогноза. При дальнейшем рассмотрении данной проблемы представляется необходимым изучить тектонику районов, где планируется или ведется строительство трубопроводов, параметры ударных воздействий в районе эпицентров землетрясений, а также физико-технические предпосылки создания средств гравитационной градиентометрии в интересах задач сейсмологии.

1. Физико-механические процессы в сейсмически активных регионах

Землетрясения занимают четвертое место в ряду природных катастроф по величине ущерба и количеству пострадавших и третье место – по количеству смертных случаев. По данным Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН средняя величина ущерба от одного землетрясения во второй половине XX века составляла более 50 млн. долларов.

До недавнего времени считалось, что разрушительные землетрясения могут возникать лишь в пределах современных горных областей Земли и регионах с наиболее высокой сейсмической активностью: Тихоокеанском кольце, Альпийско-Гималайском поясе и др. Поэтому сама возможность разрушительного землетрясения в регионе, расположенном на равнинных пространствах докембрийской Восточно-Европейской платформы, в строительных проектах практически не учитывалась. Связано это было и с тем, что многие десятилетия карты нормативного сейсмического районирования, как правило, составлялись путем формализованного объединения в единые обобщенные площади конкретных мест крупных землетрясений либо скоплений их эпицентров, инструментально регистрируемых за случайный, часто недостаточно представительный срок. При этом во многих случаях выявлялась только часть потенциально опасных районов, а разрушительные землетрясения оказывались неожиданными и происходили в тех местах, где их считали маловероятными. Сама сейсмичность изучалась преимущественно лишь специалистами в области физики Земли, и главное внимание уделялось прежде всего проблемам математического описания физики твердого тела, «очага» землетрясения, теории упругости, реологическим свойствам горных пород, процессам их разрушения.

Общая картина происходящих явлений в очагах землетрясений представляется следующей. В районе очага происходят разрывы и интенсивные неупругие деформации среды. Деформации в самом очаге носят необратимый характер, а в области, внешней к очагу, являются сплошными, упругими и преимущественно обратимыми. Именно в этой области распространяются сейсмические волны. Очаг может либо выходить на поверхность, как при некоторых сильных землетрясениях, либо находиться под ней, как во всех случаях слабых землетрясений. Отправной точкой для различных теорий механизма землетрясений является гипотеза упругой

отдачи, выдвинутая Дж. Рейдом [9, 10]. Эта теория в последние десятилетия определяла прогностические модели подготовки землетрясений.

Современные взгляды на механизм прогноза сильных землетрясений в телесеismicкой зоне основаны на следующем [1, 10]. Когда напряжения в толще тектонических пород сейсмически опасной зоны достигают предельной величины, в них появляются микротрещины, а имеющиеся полости увеличиваются. Перед землетрясением происходит увеличение пористости пород и равномерное распределение трещин по всей очаговой области и вокруг нее. За несколько часов до магистрального разрыва в очаге будущего землетрясения образуется упорядоченная (в статистическом смысле) система трещин, протяженность которой соответствует длине предстоящего разрыва. При приближении момента землетрясения система трещин переходит в предкритическое состояние (возникают так называемые предтрещины) и с падением прочности пород и под влиянием слабых внешних возмущений, а также вследствие продолжающегося процесса упорядочивания возбуждается и колеблется как единое целое, излучая сейсмическую энергию. При этом высокочастотная часть энергии поглощается в самом очаге и его окрестностях, а колебания на низких частотах 1–5 Гц распространяются по земной коре на тысячи километров. По мере возрастания критичности состояния в очаге будущего землетрясения интенсивность колебаний предтрещины увеличивается, а эмиссия сейсмической энергии ведет к дальнейшей упорядоченности системы трещин и падению прочности пород, что в конце концов и приводит к магистральному разрыву. Такая концепция объяснения природы оперативных предвестников полностью подтвердилась в 1980-е годы наблюдениями над многочисленными катаклизмами, происходившими на расстоянии до 11 тыс. км от станции [1, 5].

Накопленные на сегодняшний день факты свидетельствуют о том, что подавляющее число землетрясений, и тем более разрушительных, приурочено к относительно узким, но протяженным тектоническим швам, современным «живым» разломам Земли, накапливающим ее упругие напряжения и деформации в периоды относительного покоя, а затем релаксирующих их в виде быстрых подвижек вдоль наиболее активизированной в данный момент части такого разлома. Это и вызывает сейсмические колебания, которые в форме продольных, поперечных и поверхностных типов волн пронизывают всю Землю и могут несколько раз ее обогнуть, пока не затухнут. Понятие «очаг» землетрясения также перестало быть абстрактным «гипоцентром», а оказалось реально существующим в пространстве и времени трехмерным геологическим телом размером в десятки и сотни километров, часто с неоднократным вспарыванием конкретных участков региональных разломов последовательными сериями форшоков и автершоков.

Установлено, что региональные швы «живых» разломов, как правило, объединяются в еще более протяженные глобальные сейсмогенные тектонические зоны, располагающиеся на стыках крупнейших, по разному развивающихся структур Земли [11]. При этом такие глобальные зоны «живых» разломов существуют не только в современных, интенсивно поднимающихся горных областях (типа Гималайской), но и на древних, считавшихся в сейсмическом плане стабильными, платформах, которые эти зоны разделяют на части, развивающиеся в геологическом плане различным образом. Территория Северо-Западного региона России (в том числе район Санкт-Петербурга и его окрестностей) как раз оказалась приуроченной к такой полосе достаточно интенсивных неотектонических дислокаций. Эти

дислокации шириной до 150–200 км и протяженностью более 2000 км прослеживаются от Белого моря через Онежское и Ладожское озера, Финский залив и отделяет Русскую плиту с докембрийским кристаллическим фундаментом от Балтийского щита Восточно-Европейской платформы [11, 12]. В связи со строительством газопровода проекта «Северный поток» остановимся на тектонике этого региона более подробно.

2. Тектоника региона строительства газопровода проекта «Северный поток»

Практически вся трасса газопровода проекта «Северный поток» (весь морской участок и сухопутная часть до района Вологды) проходит по территории границы Балтийского кристаллического щита и Русской плиты. Эта линия в геологической литературе называется «линией Брегера-Полканова» [11, 12]. Она представляет собой длительно формировавшуюся сейсмически активную зону шириной 150–200 км с многочисленными тектоническими разломами, простирающуюся от побережья Баренцова моря на северо-востоке, проходит по Балтийскому морю и на западе охватывает восточное побережье Скандинавского полуострова – район Фенноскандии, объединяющий скандинавские государства, Карелию, Кольский полуостров и Ленинградскую область. В современный период происходит интенсивное сводовое поднятие Балтийского щита со скоростью до 10 мм в год.

Указанные особенности тектонического строения Восточно-Европейской платформы, свидетельствующие о сейсмической активности в зоне планируемой трассы газопровода, описаны в геологической и геофизической литературе [11, 13 и др.]. Фактор сейсмичности вследствие поднятия Балтийского щита проявляется в виде многочисленных землетрясений, эпицентры которых распределены по территории щита неравномерно с концентрацией наиболее интенсивных катаклизмов в районах Северного моря и Ботнического залива. На этом фоне территории восточнее линии Брегера-Полканова выглядят сравнительно слабосейсмичной зоной с преобладанием слабых землетрясений (до 2 баллов), которые Пулковская сейсмическая станция, например, фиксирует в окрестностях Санкт-Петербурга каждый год по несколько сотен [11].

Однако изучение исторических материалов, а также обращение к событиям недалекого прошлого и настоящего времени говорит о том, что в регионе достаточно часто происходят и сильные землетрясения [13]. Например, в полосе вдоль границы России с Финляндией от Кандавакши до Выборга согласно информации из каталога [13] (раздел XIII, Балтийский щит, 1626–1974 гг., с. 460–464) в период с 1873 по 1969 гг. произошло 30 землетрясений с магнитудой выше 5 баллов, в том числе девять – с магнитудой до 6 баллов. После выхода из печати упомянутого каталога (1975 г.) в этом регионе зафиксированы в 1989 г. землетрясения с магнитудой около 8 баллов (Кировский рудник в Хибинском массиве) и с магнитудой 6 баллов с эпицентром около Териберки в Мурманской области (1990 г.) [14].

Что касается территорий сейсмической зоны вне современных границ РФ, то иностранными учеными за 35 лет наблюдений в период 1951–1985 гг. зафиксировано около 2000 землетрясений в регионе Балтийского щита; из них лишь 72% – с магнитудой до 3 баллов, остальные, а их количество превышает 500 катаклизмов, – более интенсивные. Там и ранее происходили сильные землетрясения: например, в 1904 г. – землетрясение с эпицентром на границе Швеции и Финляндии (8 баллов); в 1992 г. – в районе Брюсселя (6 баллов) [15].

Непосредственно на морском участке планируемой трассы газопровода в 1977 г. произошло землетрясение с магнитудой 6–7 баллов и эпицентром на острове Осмуссар в западной части Финского залива. Это событие для сейсмологов оказалось неожиданным, но изучение исторических материалов показало, что в предыдущие 200 лет здесь было шесть землетрясений с такой же интенсивностью [13].

Нельзя не отметить и землетрясение 21 сентября 2004 г. с эпицентром в Калининградской области, т. е. в месте выхода газопровода на сухопутный участок. Его интенсивность составила 5–6 баллов.

Таким образом, тектоника региона, в котором планируется трасса «Северный поток», хотя и значительно уступает по своей активности Тихоокеанскому кольцу или Альпийско-Гималайскому поясу, выглядит тем не менее достаточно сейсмоопасной, причем прежде всего это относится к морскому участку трассы вдоль линии Брегера-Полканова, а также восточнее и западнее ее (от Брюсселя до северо-восточной оконечности Ладожского озера). Однако традиционное отношение к вопросам сейсмичности данного региона РФ иллюстрируется, например, количеством сейсмических станций, которых в скандинавских странах имеется около 100 (в одной Финляндии – 12), тогда как на примыкающей территории Северо-Запада России гораздо большей площади – всего две: в Пулково и Апатитах.

3. Ударные воздействия при землетрясениях и риски при строительстве

В рамках настоящей статьи не преследуется цель рассмотрения общей характеристики ситуации, возникающей в результате сейсмической активности. Для этого имеется обширная литература [16]. Здесь акцент ставится на вопросах, связанных лишь с прокладкой трассы газопровода проекта «Северный поток».

Опыт регистрации динамики движения поверхности Земли при сильных землетрясениях свидетельствует о том, что ударные волны большой интенсивности распространяются в радиусе до 200 км от эпицентра. Например, при Байсорунском землетрясении (Тянь-Шань, 12 ноября 1990 г. 6,7 баллов), параметры которого регистрировались 25-ю ближайшими сейсмическими станциями, на расстоянии 35 км от эпицентра наблюдалось 13–15 колебаний твердого грунта с ускорениями до 0,7 g и частотой 4–5 Гц при длительности больших амплитуд 2,6–3 с [17]. Следует отметить, что критическим уровнем горизонтальных ускорений для сооружений является величина амплитуды, превышающая 0,05 g.

Что касается снижения риска путем сейсмостойкого строительства, то при использовании безусловной сейсмостойких конструкций этого недостаточно для надежного обеспечения сейсмобезопасности.

Примером удачного применения сейсмостойких конструкций является Трансаяский нефтепровод, построенный в начале 60-х гг. Здесь трубопровод протяженностью 1300 км уложен на эстакаде с амортизирующими опорами, благодаря чему нефтепровод без существенных повреждений выдержал землетрясение 7,9 баллов по шкале Рихтера с эпицентром на расстоянии несколько км от трассы.

Стоимость этой конструкции (в современных ценах) составляет около \$28 млрд., и хотя эти затраты в данном случае себя полностью оправдали, следует заметить, что в данном регионе имели место землетрясения и с более высокой интенсивностью (до 9 баллов), превышающей противударные возможности данной конструкции, и тогда запаса прочности и хода амортизаторов нефтепровода было бы недостаточно.

Значительно позднее построенный Северо-Сахалинский нефтепровод, уложенный в грунт, при менее интенсивном землетрясении 1995 г., когда был разрушен город Нефтегорск с тысячами человеческих жертв, получил более 200 прорывов с разливами нефти на большой территории. Нефть попала в нерестовые реки и далее – в заливы и прибрежные акватории Охотского моря. Размеры экономического ущерба и последствий экологической катастрофы, не ликвидированных до настоящего времени, не поддаются оценке.

Землетрясение в январе 1995 г., разрушившее город Кобе (Япония), показало, что стихия сильнее, чем прочные стены (японское правительство после этого в полтора раза увеличило расходы на исследования природы катастроф). Опыт многочисленных разрушительных землетрясений указывает, что существующие конструкции сейсмостойких сооружений не всегда способны обеспечить гарантированную защиту.

4. Результаты экспериментальных исследований методов гравитационной градиентометрии в задаче оперативного прогноза землетрясений

Выше отмечалось, что идея использования ГВ в качестве сейсмоприемника для оперативного прогноза землетрясений была впервые реализована на экспериментальных установках ИФЗ РАН в 1980-х – начале 1990-х гг. Положительные результаты этой работы указали на состоятельность оперативного прогноза землетрясений средствами гравитационной градиентометрии [1, 5]. При этом на установке была достигнута чувствительность, обеспечивающая мониторинг сейсмической обстановки на удалении около 11 тыс. км от станции (расстояние от Москвы до Курильских островов) [1].

Перспективность использования ГВ для прогноза землетрясения подтверждается и результатами наблюдений сигналов ГВ в Казахстане, где в конце 1980-х гг. семь сейсмических станций были оснащены 18-ю установками спаренных ГВ [6]. Эти приборы выполнены по моделям 1920–30 гг., когда они выпускались для целей поисковой геологоразведки и геодезии. Их функциональные свойства соответствуют требованиям мониторинга сейсмической обстановки в пределах региона (сотни километров). Основным недостатком этих приборов состоит в том, что все модели геофизических ГВ и градиентометров являются «затушенными» (крутильная система находится в газонаполненной среде для демпфирования колебаний), т. е. обладают низкой добротностью. Это было связано с требованиями повышения производительности поисковых работ в геологоразведке, т. е. необходимостью снижения времени измерения, что противоречит условию создания высокодобротной крутильной системы для повышения чувствительности прибора к сейсмическим воздействиям. Однако, несмотря на сравнительно низкую чувствительность этих приборов, накануне катастрофического занесенного в топ-лист столетия Суматранского землетрясения (2006 г.) интенсивностью 9,6 баллов при расстоянии более 4 тыс. км от эпицентра показания приборов превысили измерительный диапазон – приборы «зашкалили». Подробные статистические данные по этим наблюдениям представлены в работе [6]. На рисунке представлен характерный график, где по оси абсцисс отложено время в часах, по оси ординат – угол закручивания нити маятникового прибора (гравитационного вариометра) в относительных единицах. Вертикальной линией со стрелкой на рисунке обозначен момент землетрясения с магнитудой 6,1, которое произошло 4-го февраля 1998 г. с эпицентром на расстоянии 893 км от г. Алматы.

На рисунке видно, что за 50 часов до катаклизма сигнал гравитационного вариометра из невозмущенного состояния (точка а) стал резко изменяться (интервал аб) и через 12 часов установился на смещенном уровне (ΔU), где оставался неизменным в течение 40 часов. В конце этого интервала (точка в) произошло землетрясение, что отразилось в эволюциях сигнала вариометра. Характер записи сигналов гравитационного вариометра здесь полностью соответствует приведенным выше теоретическим соображениям о механизме процесса подготовки землетрясения: сигнал тревоги о предстоящем катаклизме на временной шкале сформирован в точке б, т. е. отчетливо и контрастно проявился более чем за 1,5 суток до события. При этом величина смещения уровня сигнала (ΔU) содержит информацию об азимуте эпицентра и интенсивности предстоящего землетрясения.

Таким образом, даже при сравнительно низкой чувствительности использованных моделей ГВ результаты наблюдений их сигналов подтверждают теоретические выводы о перспективности методов гравитационной градиентометрии для решения задачи оперативного прогноза землетрясений.

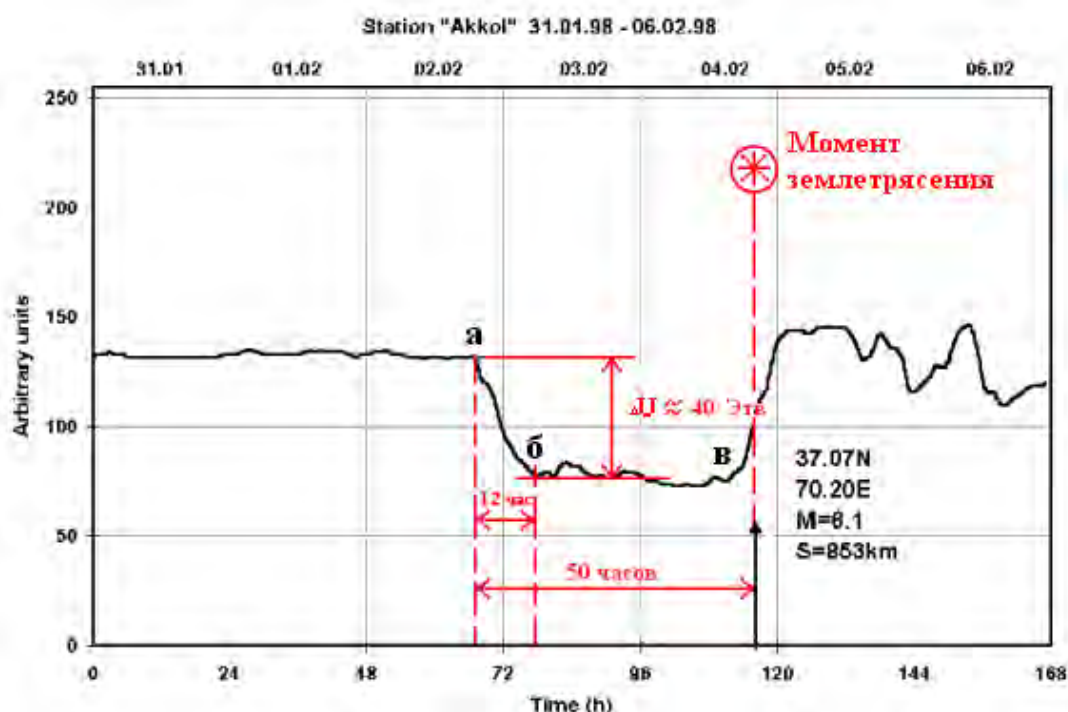


Рис. 2. Характерный вид аномалии сейсмического фона в записи сигналов гравитационных вариометров службы МЧС Казахстана

Выводы:

1. Строительство нефтегазовых и других трубопроводов в зонах активных тектонических разломов сопряжено с рисками аварийных ситуаций вследствие угрозы землетрясений. Морской участок газопровода проекта «Северный поток» находится в потенциально опасной области тектонических разломов блоков литосферы («линия Брегера-Полканова»), где систематически происходят землетрясения, в том числе и сильные.

2. Северо-Западный регион РФ крайне слабо оснащен станциями наблюдения за тектоническими процессами в зоне трассы газопровода проекта «Северный поток».

3. Научно-технический задел, созданный при разработках в области наземной и бортовой гравитационной градиентометрии, а также многолетние теоретические и экспериментальные исследования в интересах сейсмологии позволяют реализовать системы оперативного предупреждения о готовящемся землетрясении с определением его интенсивности и координат места очага.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин И. И., Матюнин В. П., Ньюнина Н. А., Гетманская В. В. Оперативный прогноз землетрясений в телесеismicической зоне – реальность. // ДАН. – 1992. – Т. 323. – №6. – С. 1068–1061.
2. Вольфсон Г. Б. О возможности использования современного гравитационного вариометра для прогноза землетрясений // Гироскопия и навигация. – 2001. – №4. – С. 33–45.
3. Пешехонов В. Г., Вольфсон Г. Б. Решение проблемы создания гравитационного вариометра для работы на подвижном основании // ДАН. – 1996. – Т. 351. – №6. – С. 766–768.
4. Вольфсон Г. Б., Евстифеев М. И., Розенцвейн В. Г., Безруков С. Ф., Никольский Ю. И., Рокотян Е. В., Семенова М. П. Новое поколение гравитационных вариометров для геофизических исследований // Геофизическая аппаратура. – 1999. – №102. – С. 122–135.
5. Калинин И. И. Горизонтальные крутильные весы – сейсмоприемник с многолепестковой диаграммой направленности // ДАН. – 1991. Т. 317. – №4. – С. 868–872.
6. M.S.Khaidarov, V.V.Plyina, A.Nurmagambetov, K.A.Khaidarov, P.B.Loksha - Relation of Deviations of Torsion Pendulums with Season Seismicity on the North Tien-Shan. - Problems of destructive earthquake disaster prevention. Proceedings of the second Kazakhstan-Japan workshop 23-25 September 2002.Almaty-EVERO. 2003. – P. 235–243.
7. Вольфсон Г. Б. Новые технологии в гравитационной градиентометрии // Гироскопия и навигация. – 2003. – №1. – С. 99–109.
8. Вольфсон Г. Б. Состояние и перспективы развития гравитационной градиентометрии. В сб. «Применение гравитационных технологий в геофизике». – СПб.: ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – С. 90–105.
9. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. – 540 с.
10. Линьков Е. М. Сейсмические явления. Л.: Изд. ЛГУ, 1987. – 260 с.
11. Никольский Ю. И. Грозит ли Санкт-Петербургу разрушительное землетрясение? // Российский геофизический журнал. – №5–6, 1995. – С. 44–59.
12. Геологическая карта дна Балтийского моря и прилегающей суши м-ба 1:500000. Гл. ред. А. А. Григалис. СПб: Картфабрика ВСЕГЕИ, 1993. – 130 с.
13. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. – 350 с.
14. Верба И. И.. Сейсмическая опасность: слухи и реальность // Петрозаводский университет. – №10, 2002. – С. 27–42.
15. Kakkuri I. The stress phenomenon in the Fennoscandian Shield // FGJ, Helsinki, 1993, No115.
16. Фремд В. М. Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений. М.: 1978. – 430 с.
17. Нурмагамбетов А., Михайлова Н. Н., Садыков А., Гапич В. А., Власова А. А., Сабитов М. М., Хайдаров М. С. Байсорунское землетрясение 12 ноября 1990 г. www.knds.kz/rus/earthquakes/baisorun.doc; www.knds.kz/rus/earthquakes/baisorun.pdf.

ON THE PROSPECTS OF USING THE GRAVIGRADIENTOMETRIC EQUIPMENT FOR THE SEA SECTIONS OF PIPELINES IN ORDER TO PROVIDE THE OPERATIVE FORECASTS OF THE EARTHQUAKE THREATS

G. B. Wolfson

(The General Research Institute "Electropribor"),

P. I. Maleyev

(OJSC «GNINGI»)

The significance of the operative earthquake forecasts for the sea sections of the oil, gas and other pipelines, the tectonics of the areas where their construction is planned or carried out, as well as the values of the expected shock impact in the areas of the earthquake epicenters are considered.

Based on the results of the theoretical and experimental investigation, the possibility of the operative (1-1,5 days) earthquake forecasts, using the gravigradienometric equipment is shown. In the Russian Federation there is a considerable amount of scientific and technical developments of such equipment, obtained when designing the shipborne means of measuring the deviation of the vertical in the sea water areas.

ГРНТИ 78.25.25.39

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ
ГРАВИГРАДИЕНТОМЕТРИЧЕСКОГО СЕЙСМОПРИЕМНИКА ДЛЯ
ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Г. Б. ВОЛЬФСОН,

(ЦНИИ «ЭЛЕТРОПРИБОР»),

П. И. МАЛЕЕВ

(ОАО «ГНИНГИ»)

Рассмотрены частотные свойства сигналов, предшествующих землетрясению, дана оценка существующих средств в сейсмологии, показаны особенности построения гравиградиентометрического сейсмоприемника, позволяющего прогнозировать землетрясения и определять их координаты. Данная статья написана в развитие идей, изложенных в работе [1]. Разработка нового сейсмоприемника, не имеющего мировых аналогов, требует рассмотрения характера прогностических сигналов, на которые он должен откликаться, поскольку отсюда вытекают требования к его физико-механическим характеристикам, структуре, составу и конструкции. При этом, естественно, возникают вопросы о причинах, препятствующих решению этих задач традиционными средствами, которыми располагает современная сейсмология.

Основой построения рассматриваемого сейсмоприемника являются гравитационные градиентометры, предназначенные для определения тензора вторых производных гравитационного потенциала и гравитационные вариометры, измеряющие его компоненты. Эти приборы никогда раньше в сейсмологии не

применялись, а использовались лишь в геологии и геодезии. Они весьма сходны с наиболее чувствительными сейсмографами. Это следует из того, что гравитационные вариометры (ГВ) класса точности 1 ЭТВ (а десятки моделей ГВ и гравитационных градиентометров, производившиеся в прошлом веке разными странами, обладают близкими характеристиками) способны откликаться на изменение силы тяготения величиной около $10^{-11} g$. Но для создания гравиградиентометрического сейсмоприемника (ГГСП), решающего задачи оперативного прогноза землетрясений, этого недостаточно. Такой прибор кроме чувствительности к инерционным воздействиям, вызываемых сейсмическими волнами, должен обладать рядом специфических свойств.

ГГСП, построенный по образцу ГВ, принципиально может измерять составляющие гравитационного градиента, т. е. применяться по прямому назначению геофизических ГВ, однако на сейсмической станции должен использоваться совершенно иначе (следует заметить, что в условиях сейсмической станции измерения второй производной гравитационного потенциала не имеют смысла). Предметом измерения ГГСП являются вибрационные воздействия, вызванные колебаниями земной поверхности вследствие сейсмической активности в удаленной телесеismicкой зоне, и несущие информацию о прогностических признаках. Для геофизических приборов эти воздействия являются источниками погрешностей вследствие гантельного эффекта в ГВ, иногда весьма неприятными помехами, которые могут даже вывести приборы из строя.

Теория гантельного эффекта в гравитационной градиентометрии относится к области механики твердого тела, обладающего несколькими степенями свободы вращения и анизотропными свойствами тензора инерции рабочего тела при его пространственных колебаниях [2]. Эта теория позволяет решить обратную задачу сейсмологии в форме аналитической зависимости между величинами сигналов ГВ и основными прогностическими параметрами: координатами места очага и времени предстоящего землетрясения. Важность решения этой задачи определяется тем, что из полученных зависимостей вытекают направленность проектных решений по конструкции ГГСП, требования к его элементной базе, технологии изготовления, к структуре и составу сейсмической антенны, а также к алгоритмам обработки информации, содержащейся в сигналах ГГСП.

1. Частотные свойства сигналов от источников предшествующих землетрясению

В записи сигналов сейсмографов содержится широкий спектр гармонических компонент, характеризующих подвижки основания в месте установки приборов. Они возникают вследствие многих причин, в том числе и техногенных, но значительное количество гармоник в полосе пропускания прибора вызвано тектоническими процессами, причем информативными компонентами являются низкочастотные (ниже 5–10 Гц) упругие колебания, которые в виде объемных и поверхностных волн распространяются на большие расстояния от источника [3, 4].

Источников упругих волн тектонического происхождения очень много: в течение года на планете происходит около миллиона (!) землетрясений, подавляющее большинство которых слабые, около ста – разрушительной силы, а одно из них может быть катастрофическим [3, 5]. Сейсмология обычно различает катастрофические, разрушительные, сильные и слабые землетрясения. К сильным

относят землетрясения с магнитудой более 5,5 баллов по шкале Рихтера. Слабые землетрясения (силой меньше 2–3 баллов) обладают энергией на несколько порядков меньшей, чем сильные или разрушительные землетрясения, но возникают они повсеместно. Последнее обстоятельство, а также тот факт, что они происходят достаточно часто (в среднем на планете каждую минуту) представляется немаловажным хотя бы потому, что даже если бы удалось из записанных на сейсмографе сигналов устранить высокочастотные помехи, вызванные главным образом техногенными шумами и удаленными источниками тектонического, океанического или атмосферного происхождения, то в оставшемся спектре длиннопериодных колебаний будут преобладать компоненты, обусловленные многочисленными маломощными тектоническими источниками, расположенными вблизи сейсмической станции. Так, например, Пулковская сейсмическая станция регистрирует каждый год несколько сот таких слабых землетрясений в регионе Балтийско-Скандинавской плиты [4, 6]. Воздействие каждого из них кратковременное, однако их много, и на их фоне трудно идентифицировать регулярные цуги упругих волн – предвестники сильных землетрясений с удаленными очагами, но в том же частотном спектре.

Это связано и с тем, что сейсмографы, установленные на станциях, являются широкополосными устройствами, в сигналах которых присутствуют одновременно все гармоники частотного спектра сейсмиков в пределах полосы пропускания приборов. В результате картина сигнала оказывается хаотичной, а его спектральный анализ приводит к искажению наиболее информативных низкочастотных компонент вследствие того, что высокочастотные составляющие спектра более интенсивные, и аналоговые датчики первичной информации обладают рядом технических погрешностей (например, нелинейной характеристикой).

При этом все сейсмические станции, дислоцированные в различных точках планеты, в определенном смысле находятся в одинаково сложном положении: принимаемые сигналы с признаками предвестников катаклизма от отдаленного эпицентра у них разные из-за географического расположения станций, а также отличий технических параметров аппаратуры на каждой из них. Помехи от маломощных, но близко расположенных землетрясений тоже разные, поскольку их источники находятся в ближайшем регионе. В результате даже при объединении сейсмических станций в единую сеть принятие согласованного решения об объявлении тревоги весьма рискованно, так как интерпретация характера записи сейсмографов в такой ситуации по существу эмпирическая (если не эмоциональная), а ложная тревога чревата соответствующими последствиями [4].

Иначе обстоит дело в момент сильного землетрясения, когда мощный сигнал на низкой частоте на порядки превосходит обычный сейсмический и техногенный фон даже на удаленных от эпицентра станциях, везде регистрируется, идентифицируется и является источником полезной информации для геофизики. Однако для прогноза случившегося катаклизма это уже бесполезно.

2. Оценка современных технических средств в сейсмологии

Полнота и качество информации о геофизических явлениях, предопределяющие развитие теории и эффективность решения задач геофизики, зависят от состояния инструментальных методов исследования. Успехи сейсмологии в последние десятилетия обусловлены развитием длиннопериодной сейсмометрии для изучения строения и свойств глубинных оболочек Земли, механизма очага

землетрясений и его энергетических характеристик [5, 7]. Современные сейсмометры определяют интегральные характеристики очага землетрясений, регистрируя сейсмические волны в диапазоне частот 0,005–10 Гц с предельной чувствительностью к перемещениям основания до 10^{-9} м [3, 4].

В конечном счете задача сейсмологической аппаратуры состоит в измерении параметров движения основания на станции наблюдения аналогично средствам инерциальной навигации. Основное отличие – в диапазоне входных воздействий, выражающееся в несколько порядков величины. Действительно, амплитуда ускорений при перемещении на 0,01 мкм с частотой 0,1 Гц составляет 4×10^{-10} g, а амплитуда колебаний кажущейся вертикали – 2×10^{-5} угл. сек. Заметим, что в сейсмологии задачи не ограничиваются чувствительностью прибора, а состоят в измерении переменных во времени сигналов с высокой точностью. Очевидно, что непосредственное измерение подобных сигналов даже современными техническими средствами весьма затруднительно. В гравитационной градиентометрии решение аналогичной задачи при наземных измерениях градиента силы тяготения существенно упрощается тем, что входной сигнал статичен, и теоретически нет ограничений в полосе пропускания измерительного прибора; здесь важное значение имеют технические характеристики элементной базы (например, крутильная жесткость устройства подвеса гантели) или экономические соображения (в поисковой геологоразведке от времени измерения сигнала зависит производительность работ).

Традиционное направление в разработках и совершенствовании сейсмометрической аппаратуры предусматривает создание широкополосных приборов, частотные характеристики которых смещаются в длинноволновую область, что позволяет обеспечивать наблюдение поверхностных волн и собственных колебаний Земли с периодами до десятков минут [3, 4].

Применяемые в сейсмологии приборы представляют собой длиннопериодные маятниковые системы различных конструкций, а их задача состоит в измерении перемещений основания, с которым связана ось подвеса инерционной массы. При этом угловые колебания маятника (β) вследствие поступательных перемещений основания (x) происходят согласно уравнению

$$\beta(p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2) = \frac{\omega_0^2}{g} p^2 x, \quad (1)$$

где ω_0 – собственная частота маятника;
 ξ – относительный коэффициент демпфирования;
 p – символ дифференцирования.

Из частотной характеристики сейсмометра (рис. 1а)

$$\Phi(p) = \frac{\beta(p)}{x(p)} \quad (2)$$

следует, что сигналы в высокочастотной области (справа от ω_0) воспроизводятся без искажений за исключением зоны около собственной частоты, а низкие частоты прибор не фиксирует.

Стремление расширить низкочастотный (рабочий) диапазон сейсмометра означает уменьшение собственной частоты системы ω_0 (рис. 1а).

Следует отметить, что при таком подходе отчетливо проявляется принципиальное отличие сейсмоприемника от акселерометра, определяющего положение кажущейся вертикали (рис.1б), когда вместо (1) имеем:

$$\beta(p) = \frac{\omega_0^2 W(p)}{g(p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2)}, \quad (3)$$

где W – поступательное ускорение основания прибора.

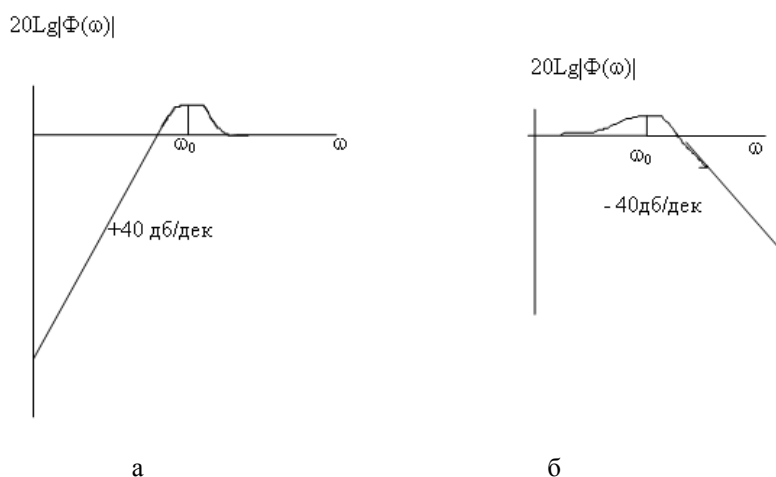


Рис.1. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики сейсмометра (а) и акселерометра (б)

Из сравнения частотных характеристик, изображенных на рис. 1, следует, что различие в их формировании сводится к следующему:

- для измерения ускорений основания (акселерометр) полосу пропускания системы целесообразно расширять, т. е. ω_0 сдвигать вправо;
- для измерения перемещений основания (сейсмометр) собственную частоту маятниковой системы нужно снижать, т. е. ω_0 сдвигать влево. Последнее важно потому, что низкочастотные компоненты сейсмических колебаний в геофизике наиболее информативны.

Отсюда вытекают и основные трудности как в исполнении сейсмометра, так и в методах интерпретации его сигналов, частотный спектр которых, наряду с полезными низкочастотными компонентами, содержит набор высокочастотных составляющих в основном техногенного происхождения, а также их различных модуляций, биений и т. п. в преобразователях сигналов, поскольку интенсивность высокочастотных помех значительно выше полезных длиннопериодных сейсмов.

В результате характер записи сигналов сейсмографов представляет собой широкий частотный спектр составляющих подвижек основания с различными всплесками, регулярными и случайными гармониками, на хаотичном фоне которых эволюции информативных компонент выделить достаточно сложно [4].

Что касается технического исполнения сейсмометров, то при всем их разнообразии, естественном при более чем столетней истории сейсмологии, в

подавляющем большинстве конструкций их маятниковые системы либо основаны на принципе устройства горизонтального маятника для измерения перемещения основания в плоскости горизонта, либо представляют собой это узкополосный гравиметр для измерений вертикальных сейсмоз [7]. Общей технической проблемой маятниковых приборов является обеспечение:

1 – минимальных вредных моментов вокруг осей чувствительности;

2 – масштаба записи сигналов при значительном усилении сигналов датчиков первичной информации (при индикации перемещений на уровне 10^{-8} м, например, в габаритах прибора порядка 1 м необходимо измерять углы колебаний подвижной части сейсмометра с разрешающей способностью 10^{-3} угл. сек.) в широком частотном диапазоне;

3 – экранирования от магнитных полей, вибраций и микросейсмоз техногенной природы от близкорасположенных объектов и т. д. [4].

Следует отметить также и проблему устойчивости схем горизонтальных маятников с большим периодом собственных колебаний, причем альтернатива в виде конструкции математического маятника означает совершенно неприемлемые габариты прибора (до десятков метров), а конструкции типа физического маятника в этом смысле не лучше горизонтального маятника вследствие трудностей обеспечения балансировки вывешенного инерционного рабочего тела [8].

При формировании частотной характеристики сейсмометров представляется естественным стремление к созданию системы с демпфированием, близким к критическому, с тем, чтобы резонансный всплеск оказывал минимальное влияние на искажение масштаба записи сигнала в зоне спектра около собственной частоты прибора, поскольку эта область частот в геофизике наиболее информативна [4]. Однако это означает необходимость введения в прибор демпфирующих устройств с вытекающими отсюда диссипативными потерями, что негативно отражается на точности и чувствительности прибора.

Решение проблем сейсмометрии путем измерения кажущейся вертикали или непосредственно ускорений основания (акселерометрический способ) на современном уровне развития приборостроения вообще не представляется возможным; это очевидно, если привести значения численных параметров лучших сейсмометров – на частоте 0,01 Гц их чувствительность к перемещениям основания составляет 10^{-8} м, чему соответствует линейное ускорение $(4 \cdot 10)^{-12}$ g .

Приведенные оценки, не претендуя на глубину и полноту изложения наиболее существенных проблем сейсмометрии, обусловлены точкой зрения на состояние этого научно-технического направления в приборостроении с позиций, характерных для подхода к проектированию современных гравиинерциальных приборов [9, 10]. Здесь можно отметить, с одной стороны, сходство в принципах построения чувствительной системы тех и других устройств (несмотря на различия в функциональном назначении и условиях работы), с другой – определенную архаичность в техническом исполнении сейсмометров.

Вместе с тем нельзя недооценивать роли сейсмической аппаратуры в развитии наук о Земле и вообще жизнедеятельности, так как только эти приборы в настоящее время обеспечивают сведения о внутреннем строении и закономерностях изменения сейсмической активности планеты, о помехах, препятствующих проведению ряда физических исследований и повышению эффективности различной измерительной

аппаратуры, и, наконец, прогнозирование землетрясений и цунами, угрожающих самой жизни. Но столь широкий круг задач, решаемых одними и теми же приборами, является, по-видимому, не только достоинством, но и причиной некоторых неудобств, когда ставятся определенные цели, отражающие локальную проблему.

Здесь имеется в виду проблема оперативного прогноза сильных землетрясений, с которой современная сейсмология явно не справляется, о чем свидетельствуют последствия катаклизмов, происходящих на планете. Несмотря на работу тысячи сейсмических станций, размещенных в разных странах и объединенных в единые сети, за всю историю цивилизации практически никогда не было оперативного предупреждения о предстоящей катастрофе.

3. Гантельный эффект в приборе с крутильным маятником

Использование ГВ в качестве сейсмоприемника основано на гантельном эффекте, который состоит в том, что при пространственных колебаниях вывешенного твердого тела с тремя степенями свободы по угловым координатам и анизотропными свойствами тензора инерции возникают крутящие моменты вокруг осей поворота вида [8, 9]:

$$M_z = (J_y - J_x)\Omega_x\Omega_y \quad (4)$$

где Ω_x, Ω_y – угловые скорости колебаний вывешенного тела вокруг осей, совпадающих с его главными осями инерции x, y (в конструкциях ГВ первого рода эти оси лежат в плоскости горизонта);

J_x, J_y – главные моменты инерции.

В ГВ первого рода вокруг вертикальной оси z происходят крутильные колебания гантельного коромысла, две другие угловые координаты отражают колебания гантели вокруг горизонтальных осей как физического маятника. Принципиальное значение здесь имеет различие главных моментов инерции (в случае симметричного тела $J_x = J_y$, и гантельный эффект не проявляется). Следует заметить, что гантельный эффект как физическое явление имеет место не только в ГВ. Интеркардинальная девиация гирокомпасов при качке корабля также возникает вследствие неидентичности моментов инерции гиросферы или наружной и внутренней рамок подвеса в однороторном гирокомпасе. Но в гирокомпасах различие моментов инерции связано с конструкторско-технологическими несовершенствами, тогда как асимметрия инерционных характеристик вывешенного коромысла является органическим свойством ГВ, вытекающим из принципа измерения второй производной гравитационного потенциала Земли [2].

При оценке момента (4) очевидны его следующие физические свойства. Во-первых, при маятниковых колебаниях коромысла относительно его главных осей инерции (x и y) по обеим угловым координатам с одной частотой произведение угловых скоростей $\Omega_x\Omega_y$ подобно синхронному детектированию дает постоянную составляющую, величина которой зависит от разности фаз угловых скоростей. Здесь проявляются скалярные свойства гантельного эффекта, т. е. постоянная компонента крутящего момента отсутствует, если угловые колебания по двум координатам происходят на разных частотах или временные фазовые сдвиги колебаний на одной частоте составляют $\pm 90^\circ$.

Во-вторых, векторные свойства момента (4) проявляются в случае вынужденных колебаниях маятника при действии инерционных сил, вектор которых

повернут в азимуте относительно главных осей инерции коромысла. В этом случае реакция прибора характеризуется диаграммой направленности подобно антенне, что также является органическим свойством ГВ [8, 9].

Эти свойства определяют подход к формированию структуры сейсмоприемника на базе ГВ. Здесь очевидна целесообразность создания таких условий для приема упругих волн, чтобы прибор обладал максимальной чувствительностью к сигналам в заданном частотном диапазоне и отсутствием реакции на все помехи вне этого диапазона. Эта задача может быть решена путем резонансного усиления маятниковых колебаний коромысла на рабочей частоте. Однако увеличение амплитуды колебаний по обеим координатам при их синхронизме требует совпадения фазочастотных характеристик обоих каналов маятника. Это достигается подбором приведенной длины физического маятника в зависимости от величины добротности контура при резонансной настройке прибора на прием упругих колебаний земной поверхности заданной частоты.

При вынужденных колебаниях коромысла с частотой собственных колебаний ω_c (на резонансе) происходит увеличение амплитуды по углу и скорости, т. е. для углов колебаний маятника относительно главных осей инерции коромысла имеем выражения вида

$$\beta_{\max} = \frac{Dx\omega_c^2}{g}, \quad \alpha_{\max} = \frac{Dy\omega_c^2}{g}, \quad (5)$$

и, соответственно, для угловой скорости:

$$\dot{\beta} = \Omega_y = \frac{Dx\omega_c^3}{g} \sin \omega_c t, \quad \dot{\alpha} = \Omega_x = \frac{Dy\omega_c^3}{g} \sin \omega_c t. \quad (6)$$

Здесь $D = \frac{1}{2\zeta}$ – добротность резонансного контура, x, y – поступательные перемещения основания прибора в плоскости колебаний.

Поскольку $x = A \sin \theta, y = A \cos \theta$ (здесь A – амплитуда перемещений основания прибора, θ – угол между направлением цуга сейсмических волн и одной из главных осей инерции коромысла), то согласно (4) и (6) закручивающий момент вокруг вертикальной оси получим в виде:

$$M_z = (J_y - J_x) \frac{D^2 \omega_c^6 A^2 \sin 2\theta}{2g^2} \sin^2 \omega_c t. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что резонансное усиление крутящего момента зависит от добротности настройки контура и характеризуется квадратичной формой. Это определяет высокие частотно-селективные свойства ГГСП в отличие от сейсмографов, применяемых в современной сейсмологии. Момент (7) содержит переменную составляющую с двойной частотой, не представляющую интереса, и детектированную, которая может быть измерена различными способами как гравитационный момент в вариометре, применяемом по прямому назначению. Ее знак и величина зависят от азимута вектора A перемещения основания прибора.

Отсюда следует, что закручивающий момент градиентометрического сейсмоприемника характеризуется диаграммой направленности подобно антенне [8, 11].

Рассмотренный механизм отклика прибора на сейсмические воздействия характерен для классической схемы крутильных весов Кулона первого рода, реализованной впервые в установке И. И. Калининкова и показавшей положительные экспериментальные результаты, что подтверждает состоятельность предложенной методики оперативного прогноза сильных землетрясений в телесеismicкой зоне [11].

Оценивая эту работу, следует отметить как великолепную теоретическую идею, так и культуру исполнения уникальной экспериментальной установки. Однако здесь, по-видимому, кроется и серьезная причина для пессимизма, поскольку техническое исполнение такого прибора в промышленных масштабах (для сотен сейсмических станций) представляется весьма затруднительным. Это связано прежде всего с устаревшей элементной базой типа торсионного подвеса коромысла (приборы начала прошлого века). Перспектива реализации системы для оперативного предупреждения сейсмической опасности определяется использованием современных технологий [8, 9].

Для оценки уровня полезного сигнала ГГСП приведем численный пример.

Пусть амплитуда микросейсмов A вследствие упругих колебаний земной поверхности при аномальной сейсмической активности составляет 0,3мкм (3×10^{-7} м) при частоте собственных колебаний прибора $f_c = 0,63$ Гц (при этом амплитуды ускорений и кажущейся вертикали соответствуют величинам 5×10^{-7} g и 0,1 угл. сек.). Тогда при добротности резонансной настройки маятниковой системы, равной 300 (в экспериментальных образцах геофизических ГВ с магнитным подвесом коромысла в вакуумном корпусе [9] эта величина составляла 300–500), уровень сигнала вследствие гантельного эффекта согласно формуле [7] будет соответствовать гравитационному градиенту величиной 100 Этв. Для ГВ это очень большой сигнал, который вполне адекватно указывает на возникновение сейсмической опасности.

4. Структура сейсмической антенны для определения пеленга на очаг предстоящего землетрясения.

Из формулы [7] сигнала ГВ вследствие гантельного эффекта следует, что его величина зависит от интенсивности упругих колебаний при сейсмической активности в районе очага предстоящего землетрясения и направления на этот район, т. е. измеренный сигнал имеем в форме:

$$U = C \sin 2\theta, \quad (8)$$

где C – определяет интенсивность тектонического процесса.

Из этой формулы следует, что сигнал ГГСП содержит два прогностических параметра, подлежащих определению по аналогии с традиционными обратными задачами в геологии и сейсмологии. В данном случае это ситуация одного уравнения с двумя неизвестными. Обычно для решения таких задач используется дополнительная информация от других источников, но здесь наиболее простое решение состоит в применении на станции наблюдения пары идентичных приборов, корпуса которых развернуты в азимуте на известный угол. В таком случае

ориентация главных осей инерции коромысла в обоих приборах соответствует пеленгам:

$$\theta_1 = \theta$$

$$\theta_2 = \theta + \varphi$$

Здесь φ – угол взаимного разворота приборов. Если этот угол равен 45° , например, то согласно (8) получим от пары приборов сигналы вида:

$$U_1 = C \sin 2\theta;$$

$$U_2 = C \cos 2\theta.$$

Определение прогностических параметров C и θ по этим формулам тривиально.

Очевидно, что для вычисления координат места очага предстоящего землетрясения необходимо наличие таких сейсмических антенн на разных станциях, расположенных на определенном расстоянии друг относительно друга. Тогда координаты места очага находятся в точке пересечения пеленгов, вычисленных на каждой сейсмической станции.

Выводы

1. Современная сейсмологическая аппаратура, установленная на сейсмических станциях планеты при высокой чувствительности к инерционным воздействиям тектонического происхождения и наличии диаграммы направленности не обладает частотно-селективными свойствами, необходимыми для решения задачи оперативного прогноза землетрясений.

2. Прогностическая информация, содержащаяся в сигналах гравитационного вариометра (ГВ), возникает в результате гантельного эффекта – реакции ГВ на колебания основания от сейсмических волн, излучаемых из зоны развивающегося очага землетрясения.

3. Вследствие гантельного эффекта сигнал гравиградиентометрического сейсмоприемника (ГСП) на базе ГВ содержит информацию об интенсивности предстоящего землетрясения и пеленге на его эпицентр в форме аналитической зависимости, позволяющей вычислить прогностические признаки.

4. ГСП с частотно-резонансной настройкой на прием упругих волн тектонического происхождения обладает чувствительностью к микросейсам на уровне лучших сейсмографов, диаграммой направленности подобно направленным антеннам и частотно-селективными свойствами высокодобротных фильтров.

5. Комплексы сейсмических антенн, состоящие из пар ГСП и вычисляющие пеленг на район очага землетрясения, при их установке на разных станциях наблюдения способны решить задачи оперативного прогноза с определением координат места очага.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольфсон Г. Б., Малеев П. И. О перспективности использования гравиградиентометрической аппаратуры для прогноза опасности морских участков трубопроводов от землетрясений // Навигация и гидрография. – 2009. – №28. – С. 64–74.
2. Вольфсон Г. Б., Евстифеев М. И. Особенности динамики прецизионных приборов с анизотропией инерционных свойств вывешенного тела с вращательными степенями свободы. Тр. IX Межд. Четаевской конф. «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением». – Иркутск, 2007. – Том 4. – С. 47–61.
3. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. – М.: Наука, 1983. – 540 с.
4. Линьков Е. М. Сейсмические явления. – Л.: Изд. ЛГУ, 1987. – 248 с.
5. Саваренский Е. Ф., Кирнос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. – М., 1955. – 460 с.
6. Никольский Ю. И. Грозит ли Санкт-Петербургу разрушительное землетрясение? // Российский геофизический журнал. – 1995, №5–6. – С. 44–59.
7. Фремд В. М. Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений. М., 1978. – 430 с.
8. Вольфсон Г. Б. О возможности использования современного гравитационного вариометра для прогноза землетрясений // Гироскопия и навигация., 2001. – №4. – С.33–45.
9. Вольфсон Г. Б. Новые технологии в гравитационной градиентометрии. // Гироскопия и навигация. – 2003. – №1. – С.99–109.
10. Пешехонов В. Г., Вольфсон Г. Б. Решение проблемы создания гравитационного вариометра для работы на подвижном основании // ДАН. – 1996. – 351. – №6. – С. 766–768.
11. Калинин И. И., Матюнин В. П., Нюнина Н. А., Гетманская В. В. Оперативный прогноз землетрясений в телесеismicической зоне – реальность // ДАН. – 1992. – Т. 323. – №6. – С. 1068–1071.

PHYSICAL-TECHNICAL BASES FOR CREATING THE GRAVIGRADIENTOMETRIC RECEIVER FOR OPERATIONAL EARTHQUAKE FORECASTS

G. B. Wolfson

(The General Research Institute “Electropribor”),

P. I. Maleyev

(“GNINGI” OJSC)

The frequency characteristics of the signals proceeding the earthquake are considered. The means existing in seismology are estimated. The specific features of designing the gradientometric receiver enabling the earthquake forecasts to be made and their co-ordinates to be determined, are presented.

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

ГРНТИ 78.21.43.15.19

СУЩНОСТЬ МЕТОДА ВЕРОЯТНОСТНОГО ОПИСАНИЯ УСЛОВИЙ РЕФРАКЦИИ ЗВУКА В РАЙОНАХ ОКЕАНА

**О. А. ГАСНИКОВ,
В. В. УДАЛОВ**
(ОАО «ГНИНГИ»),
В. А. ФИЛИН

(НИЦ РЭВ ВМФ — Филиал ФГУ «24 НИИ МО РФ»)

Излагается сущность способа статистического описания условий рефракции звука в различных районах океана, основанного на обобщении метода древних греков кусочно-линейной интерполяции окружности правильными многоугольниками на произвольно заданную функциональную зависимость скорости звука от глубины $c(z)$. Показано, что предложенный метод является более общим по сравнению с традиционным методом описания стратификации гидрофизических полей в районах Мирового океана.

Метод опорных точек (МОТ) – метод систематизации, обработки и обобщения банка океанографических данных разрабатывался для районирования условий рефракции в морях и океанах и их статистического (вероятностного) описания в выделенных районах в рамках плоско-слоистой модели морской среды [1, 2], нашедшей широкое применение в практике гидроакустики. Под условиями рефракции понимается не исходный (измеренный) профиль $c(z)$, а аппроксимированный кусочно-линейной функцией профиль $c_n(z)$. Эта аппроксимация широко применяется в практических методах расчета звукового поля в морской среде, основанных на лучевой теории звука [3, 4]. Кусочно-линейная аппроксимация разбивает всю толщу водной среды на сравнительно небольшое число слоёв с постоянными градиентами скорости звука. Именно эта стратификация – число и последовательность чередования слоёв с постоянными градиентами скорости звука формирует основные особенности распространения звуковой энергии в морской среде [3, 4].

В основе метода опорных точек, решающего проблемы пространственно-временного районирования условий рефракции в морях и океанах и их статистического описания в выделенных районах и сезонах года, лежит способ аппроксимации функций опорными точками (САФОТ) – вертикального профиля $c(z)$ или иначе – кривой вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ), сущность которого изложена в работе [5]. Первоначально разработанный в целях расчета звукового поля в морской среде этот способ в дальнейшем был положен в основу

разработки методов районирования условий рефракции в морях и океанах и их статистического описания в выделенных районах. Теоретически он разрабатывался для случая аналитического задания вертикального профиля $c(z)$ в виде непрерывной и дважды дифференцируемой функции на основе известных понятий математического и функционального анализа [1]. Практически в несколько упрощенном варианте он используется для кусочно-линейной аппроксимации функций, заданных в табличном либо графическом виде [2]. Именно так и представляются в банке океанографических данных вертикальные профили $c(z)$, полученные по соответствующим формулам [4, 6] по данным измерения на горизонтах наблюдений температуры и солености морской среды на глубоководных гидрологических станциях.

Метод опорных точек, разработанный на основе САФОТ, является альтернативой известному в океанологии климатолого-статистическому методу (КСМ) исследования стратификации гидрофизических полей [7]. Что в них общего и что отличает эти методы?

Из анализа сущности методов следует, что объединяет их то, что оба они используют одни и те же исходные данные. Отличает эти методы следующее:

1. Районирование гидрофизических полей акваторий океана (моря) климатолого-статистическим методом основано на принципе индукции (от частного к общему). МОТ – на более общем принципе – принципе дедукции (от общего к частному).

2. Статистическое (вероятностное) описание вертикальных профилей гидрофизических полей в районе океана (моря) климатолого-статистическим методом основано на понятиях теории случайных функций, разработанной на первом определении случайной функции как бесконечной совокупности случайных величин, определенных на интервале ее задания. Эти понятия – математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение и другие – в принципе не предназначены для описания стратификации (слоистости) гидрофизических полей в районах океана (моря) характеризуемой векторными величинами.

3. Статистическое (вероятностное) описание аппроксимированных вертикальных профилей $c(z)$ опорными точками (условий рефракции или иначе – стратификации поля скорости звука, как одного из многочисленных гидрофизических полей морской среды) в районе океана (моря) по МОТ основана на фундаментальном понятии теории случайных функций – функционале распределения, являющимся исчерпывающей характеристикой случайной функции [6] и вытекающим из второго определения случайной функции – бесконечной совокупности ее реализаций, которые являются детерминированными функциями [8–10].

В работе [1] отмечалось, что разработанный в рамках метода опорных точек способ статистического описания вертикальных профилей гидрофизического поля в пространственно-временном районе, по существу, представляет собой ни что иное, как практический способ построения функционала распределения случайной функции в дифференциальной форме с заданной подробностью (детализацией). Данный способ (метод) статистического (вероятностного) описания вертикальных профилей гидрофизического поля в пространственно-временном районе океана (моря) является более общим по сравнению со статистическим (вероятностным) описанием вертикальных профилей КСМ, так как он фактически содержит в себе

статистическое (вероятностное) описание профилей $c_i(z)$ КСМ. Если рассмотреть один и тот же пространственно-временной район океана (моря), то, имея описание вертикальных профилей гидрофизического поля в виде набора средних кривых, построенных по опорным точкам кривых ВРСЗ групп подобных, близких аппроксимированных кривых опорными точками $c_a(z)$, с соответствующими оценками вероятностей, можно получить все статистические (вероятностные) характеристики вертикальных профилей гидрофизического поля района, которые получают при обработке материалов банка океанографических данных района КСМ. Обратное невозможно. В работе [1] отмечалось, что полное сравнение этих методов можно осуществить в будущем для произвольной акватории океана (моря) после разработки машинных программ, реализующих данный метод. Такие программы для ПЭВМ к настоящему времени разработаны сотрудниками 373 Центра ВМФ М. Р. Бутягиным, В. И. Кузнецовым, Г. А. Отчаянной и сотрудниками ГНИНГИ О. А. Гасниковым, С. А. Кононовой и В. В. Удаловым под руководством В. А. Филина.

Целью настоящей статьи является сравнение результатов статистического описания вертикальных профилей в произвольно взятом конкретном пространственно-временном районе океана (моря) с достаточным числом экспериментальных данных КСМ и МОТ. Исходными данными для сравнения послужили наблюдения на 188 глубоководных гидрологических станциях, выполненные в августе с 1962 по 1986 г. в четырёхградусном квадрате северозападной части Тихого океана. Ниже приведены результаты обработки исходной информации по КСМ и МОТ в слое 0–500 м, так как в этом слое число наблюдений на горизонтах не меняется, что отражено в табл. 3. Для сравнительной оценки это вполне оправдано.

В табл. 1 в качестве примера приведены некоторые исходные профили $c_i(z)$, заданные в табличном виде в исследуемом районе океана.

В табл. 2 в качестве примера приведены аппроксимированные кусочно-линейными функциями профили $c_{ai}(z)$ исходной информации, представленные в табл. 1.

В табл. 3 приведены рассчитанные по исходной информации $c_i(z)$, $i=1...188$, статистические характеристики на стандартных горизонтах, полученные КСМ:

- $c_{cp}(z)$ – математическое ожидание;
- $c_{min}(z)$ – минимальное значение;
- $c_{max}(z)$ – максимальное значение;
- СКВО – среднее квадратическое отклонение.

В табл. 4 представлено количество вероятностных кривых в зависимости от значения параметра группировки Δc (средних кривых по опорным точкам [6] групп близких, подобных, аппроксимированных кривых с соответствующими оценками вероятностей на основе экспериментальных данных).

Таблица 1

Пример исходной информации по району исследования

N п/п 1.		N п/п 2.		N п/п 3		N п/п 4.		...	N п/п 97.		N п/п 98.		...	N п/п 188.	
Z, м	C, м/с	Z, м	C, м/с	Z, м	C, м/с	Z, м	C, м/с	...	Z, м	C, м/с	Z, м	C, м/с	...	Z, м	C, м/с
0	1490,62	0	1501,09	0	1497,33	0	1484,99	...	0	1472,02	0	1491,65	...	0	1471,49
9	1468,05	10	1500,92	10	1495,88	10	1483,26	...	10	1470,88	20	1480,90	...	10	1471,53
28	1460,81	25	1484,42	19	1467,47	20	1469,82	...	25	1463,43	29	1469,59	...	20	1460,89
46	1456,99	50	1460,54	51	1459,27	30	1464,19	...	50	1455,31	49	1460,73	...	30	1457,19
232	1456,73	95	1457,42	101	1454,51	50	1458,30	...	100	1454,60	140	1453,93	...	199	1458,31
500	1466,79	250	1460,54	245	1464,52	101	1452,54	...	296	1465,29	187	1456,22	...	503	1465,84
		328	1465,40	396	1468,87	203	1453,21	...	391	1462,89	267	1464,57	...		
		500	1470,60	500	1468,83	254	1457,41	...	600	1468,19	345	1463,03	...		
						306	1456,97	...	1500	1479,99	500	1470,07	...		
						500	1466,22		

Таблица 2

Пример исходной информации, аппроксимированной кусочно-линейными функциями

№ п/п 1.		№ п/п 2.		№ п/п 3		№ п/п 4.		...	№ п/п 97.		№ п/п 98.		...	№ п/п 188.	
Z, м	C, м/с	Z, м	C, м/с	Z, м	C, м/с	Z, м	C, м/с	...	Z, м	C, м/с	Z, м	C, м/с	...	Z, м	C, м/с
0	1490,62	0	1501,09	0	1497,33	0	1484,99	...	0	1472,02	0	1491,65	...	0	1471,49
232	1456,73	95	1457,42	101	1454,51	101	1452,54	...	100	1454,60	140	1453,93	...	30	1457,19
500	1466,79	500	1470,60	396	1468,87	254	1457,41	...	296	1465,29	267	1464,57	...	503	1465,84
				500	1468,83	306	1456,97	...	391	1462,89	345	1463,03	...		
						500	1466,22	...	1500	1479,99	500	1470,07	...		

Таблица 3

Статистические характеристики профиля ВРСЗ, полученные КСМ

Z, м	Сср, м/с	Сmin, м/с	Сmax, м/с	СКВО, м/с	N
0	1488,11	1461,71	1517,79	12,24	188
10	1485,08	1460,49	1518,00	12,95	188
20	1475,86	1459,50	1510,76	9,54	188
25	1471,49	1452,03	1502,83	8,40	188
30	1468,62	1453,88	1495,47	7,19	188
50	1460,32	1449,36	1475,62	4,05	188
75	1457,55	1450,32	1466,46	2,92	188
80	1457,19	1450,25	1466,46	2,76	188
100	1455,82	1450,45	1466,46	2,64	188
125	1456,43	1452,13	1466,46	2,14	188
150	1457,08	1452,42	1466,46	2,11	188
200	1459,01	1453,19	1466,46	2,47	188
250	1460,79	1455,25	1466,48	2,50	188
300	1462,53	1456,66	1470,96	2,74	188
400	1465,47	1459,48	1470,26	2,40	188
500	1468,07	1461,19	1472,90	2,13	188
600	1470,11	1462,80	1474,08	2,15	119
800	1473,28	1466,03	1476,70	2,01	119
1000	1476,12	1469,26	1479,32	1,96	119
1200	1478,95	1472,49	1482,25	1,91	119
1500	1483,20	1476,74	1486,75	1,88	119
2000	1490,87	1485,41	1494,24	1,62	70
2500	1498,63	1493,49	1502,99	1,73	70
3000	1506,86	1501,56	1511,74	1,81	70
3500	1515,55	1510,81	1520,49	1,76	58
4000	1525,26	1519,59	1529,24	1,68	25
4500	1534,02	1528,37	1537,99	1,67	25
5000	1542,78	1537,14	1546,74	1,66	25
6000	1560,31	1554,69	1564,24	1,64	25
7000	1576,53	1572,24	1577,74	1,75	8

Таблица 4

Число вероятностных кривых в районе исследования в зависимости от значения параметра группировки Δc

Δc , м/с	20,0	15,0	10,0	7,5	5,0
Число групп	12	16	27	44	87

В табл. 5 в качестве примера приведены средние кривые $c(z)$ групп, построенные по опорным точкам с соответствующими номерами классов и оценками вероятности (повторяемости) в убывающем порядке, иными словами, вероятностные кривые ВРСЗ), рассчитанные по МОТ при задании параметра группировки $\Delta c=20$ м/с.

В табл. 6 представлены значения скорости звука на стандартных горизонтах, полученные с использованием вероятностных кривых (см. табл. 5), путем линейной интерполяции.

Таблица 5

Вероятностные кривые ВРСЗ, полученные с помощью МОТ при значении параметра группировки $\Delta c=20$ м/с

№ п/п 1. Класс 2. Вероятность 69,7%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1486,0
#	10	1482,3
#	19	1475,9
#	32	1468,9
#	51	1461,8
#	72	1458,9
о	112	1455,4
#	189	1458,4
#	264	1461,1
#	391	1465,0
о	500	1468,0

№ п/п 2. Класс 13. Вероятность 10,6%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1493,6
о	10	1494,1
#	17	1483,9
#	25	1473,4
#	36	1466,7
#	50	1460,1
о	92	1455,7
#	202	1459,5
#	328	1464,2
о	500	1468,8

№ п/п 3. Класс 4. Вероятность 6,9%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1485,6
#	10	1482,5
#	14	1479,1
#	21	1474,2
#	27	1467,9
#	44	1459,4
о	84	1455,3
#	132	1457,8
о	176	1461,5
#	194	1460,6
о	247	1459,1
#	288	1460,5
#	428	1465,0
о	500	1467,1

№ п/п 4. Класс 12. Вероятность 6,4%		
	Z, м	C, м/с
#	0	1509,9
о	9	1507,9
#	21	1483,4
#	28	1475,8
#	46	1462,8
#	69	1457,0
#	92	1454,0
о	139	1456,6
#	230	1462,2
#	372	1466,2
#	500	1469,2

№ п/п 5. Класс 2. Вероятность 2,1%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1462,9
#	21	1460,0
о	145	1458,1
#	246	1461,3
о	500	1466,3

№ п/п 6. Класс 15. Вероятность 1,1%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1488,4
о	10	1488,7
#	16	1473,0
#	21	1468,1
о	48	1452,1
#	64	1453,9
о	96	1461,0
о	132	1456,0
#	316	1465,3
о	500	1469,6

№ п/п 7. Класс 3. Вероятность 0,5%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1497,3
#	10	1495,9
#	19	1467,5
#	51	1459,3
о	101	1454,5
#	245	1464,5
о	396	1468,9
о	500	1468,8

№ п/п 8. Класс 12. Вероятность 0,5%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1471,4
о	10	1464,9
о	25	1467,3
#	50	1459,7
о	100	1457,7
о	150	1462,0
о	200	1459,6
о	500	1466,8

№ п/п 9. Класс 13. Вероятность 0,5%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1517,8
о	10	1518,0
#	20	1479,2
#	30	1463,8
#	50	1458,4
о	100	1456,2
#	200	1462,9
о	500	1470,3

№ п/п 10. Класс 14. Вероятность 0,5%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1483,5
о	10	1483,5
#	25	1472,0
#	50	1459,0
о	100	1453,0
#	150	1460,6
#	200	1465,0
о	400	1469,6
о	500	1467,7

№ п/п 11. Класс 15. Вероятность 0,5%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1490,4
о	10	1490,6
#	50	1462,1
о	100	1453,2
#	150	1457,4
о	300	1463,9
о	400	1463,5
о	500	1466,8

№ п/п 12. Класс 13. Вероятность 0,5%		
	Z, м	C, м/с
о	0	1511,2
о	10	1513,3
#	20	1510,8
#	29	1496,5
#	49	1476,4
#	73	1458,5
о	98	1453,5
#	196	1455,6
#	300	1461,0
о	500	1465,3

Таблица 6

Значения скорости звука на стандартных горизонтах, полученные с вероятностных кривых при значении параметра группировки $\Delta c=20$ м/с

№ п/п	Вероятность, %	Горизонты, (м)															
		0	10	20	25	30	50	75	80	100	125	150	200	250	300	400	500
1	69,7	1486	1482,3	1475,4	1472,7	1470	1462,2	1458,6	1458,2	1456,5	1455,9	1456,9	1458,8	1460,6	1462,2	1465,2	1468
2	10,6	1493,6	1494,1	1480	1473,4	1470,4	1460,1	1457,5	1457	1456	1456,8	1457,7	1459,4	1461,3	1463,2	1466,1	1468,8
3	6,9	1485,6	1482,5	1474,9	1470	1466,4	1458,8	1456,2	1455,7	1456,1	1457,4	1459,3	1460,4	1459,2	1460,9	1464,1	1467,1
4	6,4	1509,9	1505,9	1485,4	1479,1	1474,4	1461,8	1456,2	1455,6	1454,4	1455,8	1457,3	1460,4	1462,8	1464,2	1466,9	1469,2
5	2,1	1462,9	1461,5	1460,1	1459,9	1459,9	1459,6	1459,2	1459,1	1458,8	1458,4	1458,3	1459,8	1461,4	1462,4	1464,3	1466,3
6	1,1	1488,4	1488,7	1469,1	1465,7	1462,8	1452,3	1456,3	1457,5	1460,4	1457	1456,9	1459,4	1462	1464,5	1467,3	1469,6
7	0,5	1497,3	1495,9	1467,2	1466	1464,7	1459,6	1457	1456,5	1454,6	1456,2	1457,9	1461,4	1464,6	1466,1	1468,9	1468,8
8	0,5	1471,4	1464,9	1466,5	1467,3	1465,8	1459,7	1458,7	1458,5	1457,7	1459,8	1462	1459,6	1460,8	1462	1464,4	1466,8
9	0,5	1517,8	1518	1479,2	1471,5	1463,8	1458,4	1457,3	1457,1	1456,2	1457,9	1459,6	1462,9	1464,1	1465,4	1467,8	1470,3
10	0,5	1483,5	1483,5	1475,8	1472	1469,4	1459	1456	1455,4	1453	1456,8	1460,6	1465	1466,2	1467,3	1469,6	1467,7
11	0,5	1490,4	1490,6	1483,5	1479,9	1476,3	1462,1	1457,7	1456,8	1453,2	1455,3	1457,4	1459,6	1461,7	1463,9	1463,5	1466,8
12	0,5	1511,2	1513,3	510,8	1502,9	1495,5	1475,7	1458,1	1457,1	1453,5	1454,1	11454,6	1455,8	1458,4	1461	1463,2	1465,3

Таблица 7

Средние значения скорости звука и средние квадратические отклонения на стандартных горизонтах, полученные КСМ и МОТ для различных значений параметра группировки Δc

Z, м	КСМ		Метод опорных точек									
			$\Delta c = 20.0$ м/с		$\Delta c = 15.0$ м/с		$\Delta c = 10.0$ м/с		$\Delta c = 7.5$ м/с		$\Delta c = 5.0$ м/с	
	Сср, м/с	скво, м/с	Сср, м/с	скво, м/с	Сср, м/с	скво, м/с	Сср, м/с	скво, м/с	Сср, м/с	скво, м/с	Сср, м/с	скво, м/с
0	1488,11	12,24	1488,14	7,71	1488,11	9,99	1488,10	11,18	1488,13	11,7	1488,11	11,99
10	1485,08	12,95	1485,08	8,14	1485,25	10,8	1485,15	11,72	1485,03	12,49	1485,04	12,73
20	1475,86	9,54	1476,24	4,55	1476,42	7,31	1476,26	7,94	1475,91	8,89	1475,91	9,28
25	1471,49	8,40	1472,75	3,51	1472,64	6,02	1472,54	6,79	1471,98	7,55	1471,67	8,05
30	1468,62	7,19	1469,84	2,95	1469,65	4,79	1469,47	5,82	1469,24	6,4	1468,80	6,83
50	1460,32	4,05	1461,54	1,78	1461,93	2,45	1461,70	3,05	1461,39	3,14	1460,86	3,66
75	1457,55	2,92	1458,14	0,89	1458,20	1,2	1458,10	1,87	1457,99	2,14	1457,84	2,65
80	1457,19	2,76	1457,70	0,93	1457,73	1,06	1457,68	1,81	1457,57	2,02	1457,46	2,53
100	1455,82	2,64	1456,29	0,87	1456,26	0,76	1456,27	1,6	1456,14	1,78	1456,02	2,32
125	1456,43	2,14	1456,20	0,65	1456,10	0,73	1456,06	1,2	1456,09	1,47	1456,25	1,83
150	1457,08	2,11	1457,25	0,81	1457,18	0,96	1457,04	1,23	1457,06	1,47	1457,04	1,74
200	1459,01	2,47	1459,17	0,8	1459,04	0,96	1458,98	1,27	1459,05	1,57	1458,95	2,04
250	1460,79	2,50	1460,81	0,9	1460,75	1,14	1460,73	1,44	1460,80	1,57	1460,77	2,08
300	1462,53	2,74	1462,43	0,87	1462,47	1,31	1462,44	1,55	1462,45	1,76	1462,51	2,28
400	1465,47	2,40	1465,40	0,79	1465,40	1,11	1465,41	1,3	1465,43	1,54	1465,41	1,99
500	1468,07	2,13	1468,07	0,62	1468,09	0,94	1468,06	1,08	1468,06	1,35	1468,07	1,73

Анализ результатов статистического описания всего множества вертикальных профилей $c(z)$ в рассматриваемом районе северной части Тихого океана по КСМ и МОТ в интересах исследования стратификации поля скорости звука показывает, что разработанный способ статистического описания условий рефракции (стратификации) в рамках МОТ является более общим и полным по сравнению с КСМ. Действительно, сравнивая математические ожидания скорости звука на стандартных горизонтах, полученные по КСМ и по МОТ для значения параметра группировки $\Delta c = 20$ м/с, видно, что они практически не отличаются друг от друга. Максимальная относительная погрешность не превосходит 0,001, а абсолютная погрешность не превосходит точности измерения скорости звука, принятой в обработку МОТ и равной 1,5 м/с. С уменьшением значения параметра группировки Δc ошибки становятся еще меньше (см. табл. 7). Сравнение значений СКО на стандартных горизонтах, рассчитанных по КСМ и МОТ (табл. 7) показывает, что практически близкие значения этого статистического параметра получаются при меньших значениях параметра группировки Δc , в отличие от математического ожидания.

При значении параметра группировки $\Delta c = 20$ м/с исходное множество вертикальных профилей $c_i(z)$ в количестве 188 ВРСЗ преобразуется (группируется) в 12 вероятностных кривых (табл. 5) со средними значениями реально существующих элементов стратификации поля скорости звука рассматриваемого района океана. Такой информации об элементах стратификации поля скорости звука в рассматриваемом районе океана статистические характеристики КСМ не дают. Отсюда следует, что практически используемые в КСМ вероятностные (статистические) характеристики случайной функции (математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение и др.) и не предназначены для исследования стратификации гидрофизических полей морской среды. Этот эмпирический факт приводит к мысли о необходимости разработки нового направления теории случайных функций, основанного на её втором определении.

В существующей теории случайных функций [8–10] необходимые предпосылки для развития этого направления существуют. К ним относятся:

1. Дуализм в определении случайной функции.

а) Случайной функцией называется функция, значение которой в каждой точке интервала ее задания является случайной величиной. Иначе – случайной функцией называется бесконечная совокупность случайных величин на интервале ее задания. На этих определениях и построена современная теория случайных функций [8–10].

б) Случайной функцией называется бесконечная совокупность ее реализаций, каждая из которых рассматривается как детерминированная функция своего аргумента [8–10].

2. Определение исчерпывающей характеристики случайной функции – функционала распределения, введенного академиком В. С. Пугачевым, путем обобщения исчерпывающей характеристики случайной величины – ее интегрального закона распределения на случайную функцию [8].

В существующей теории случайных функций нет доказательства равнозначности этих определений (а, б). Разработанный практический метод решения задачи вероятностного описания условий рефракции в районе океана показывает, что второе определение случайной функции (б) является более общим понятием, так как описание случайной функции (условий рефракции) на его основе с

использованием понятия функционала распределения случайной функции в дифференциальной форме позволяет получить все вероятностные характеристики случайной функции, используемые в существующей теории случайных функций. Таким образом, впервые в гидроакустике найдено практическое применение фундаментальному понятию теории случайных функций – функционалу распределения случайной функции в дифференциальной форме. Разработанный практический метод построения функционала распределения случайной функции (условий рефракции) в районе океана можно рассматривать как эмпирический основополагающий факт необходимости разработки (развития) строгой, более общей математической теории случайных функций (нового ее направления), основанной на втором определении случайной функции как бесконечной совокупности ее реализаций. Эта теория позволит перейти к практическому решению прямых задач с сугубо нелинейными преобразованиями (функционалами и операторами), для которых к настоящему времени не найдено общего решения в рамках существующей теории случайных функций, основанной на определении случайной функции как бесконечной совокупности случайных величин на интервале ее задания [8–10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Филин В. А., Голованова Л. А., Данилова Л. В. Методика районирования гидрофизических полей методом «опорные точки» и ее реализация на ЕС ЭВМ. – Тр. ВНИИГМИ – МЦД. 1984. – Вып. 102, – С.80–97.
2. Кузнецов В. И., Отчаянная Г. А., Филин В. А. Технология расчета средней кривой вертикального распределения скорости звука по опорным точкам // Записки по гидрографии. – 2000. – № 249. – С. 57–63.
3. Физические основы подводной акустики. Перевод с англ. М.: Изд-во «Сов. радио». – 1955. – С. 73–120.
4. Акустика океана. Под ред. Л. М. Бреховских. – М.: Наука, 1974. – С. 81–91.
5. Филин В. А. О сущности методов кусочно-линейной аппроксимации функций опорными точками // Навигация и гидрография. – 2008. – №26. С. 57–62.
6. Толстой Н. И., Клей К. С. Акустика океана. Пер. с англ. – М.: Мир, 1969. – 302 с.
7. Галеркин Л. И. Методика исследования стратификации гидрофизических полей. – Тр. ВНИИГМИ – МЦД. Вып. 45, 1978. – С. 5–12.
8. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М: Госизд-во техн.-теорет. литературы, 1957. – 659 с.
9. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука, Гл. ред. физ.- матем. литературы. – 1991. – 384 с.
10. Рожков В. А. Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Кн. 2. СПб.: Прогресс-Погода, 1996. – С. 155–158.

THE ESSENCE OF THE METHOD OF PROBABILISTIC DESCRIPTION OF THE SOUND REFRACTION CONDITIONS IN VARIOUS AREAS OF THE OCEAN

O. A. Gasnikov, V. V. Udalov («GNINGI» OJSC),
V. A. Filin (The Navy Research Centre of EW)

The essence of the method of statistical description of the sound refraction conditions in various areas of the ocean, based on the generalized method of the ancient Greeks, the piecewiselinear interpolation of a circle by the regular polygons on the arbitrarily set functional sound velocity–depth relationship $c(z)$ is set forth. It is shown that the proposed method is of more general character as compared to the traditional method of description of the hydrophysical fields stratification in the areas of the World ocean.

**ТЕХНОЛОГИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ И ПОЛЕЙ**

Э. А. БЕЛОУСОВА
(ЗАО «СИСТЕМА»),
Ю. Н. ЖУКОВ
(ОАО «ГНИНГИ»),
Ю. П. КОРОВЯКОВСКИЙ
(ЗАО «СИСТЕМА»)

Рассматривается технологическая схема создания сетевых и локальных программных приложений, включающих трехмерную визуализацию геопространственных объектов. Отличие предлагаемой технологии состоит в том, что применяются только стандартные унифицированные программные средства, используемые в браузерах.

Высокие показатели производительности современных настольных компьютеров, а также небывалое развитие телекоммуникационных средств связи и информационного доступа создают предпосылки для визуализации геопространственных данных в трехмерном виде с возможностью анимации, вращения вокруг любой пространственной оси, плавного изменения точки обзора и масштаба просмотра. Такая технология визуализации геопространственных данных чрезвычайно эффективна для совместного изучения и мониторинга природных полей и технических сооружений. Информацию можно представить во всех масштабах: от сантиметровых до глобальных. Для рассматриваемой пространственной области можно интегрировать в представляемой пространственной сцене всю имеющуюся информацию, которая может иметь любой формат: текстовый, звуковой, растровый, векторный и так далее.

Это особенно актуально в настоящее время, когда ведутся работы по освоению шельфовой зоны северных морей, прокладки подводных газовых трубопроводов. При этом насущной задачей являются мониторинг и оперативное моделирование состояния технических систем в условиях активного воздействия на них геофизических условий. Вся необходимая для этого геопространственная информация, хранимая в базах данных и оперативно собираемая с удаленных пунктов наблюдения за текущей обстановкой по каналам связи, должна аккумулироваться и отображаться в виде виртуальной трехмерной сцены, как, например, визуализация условий состояния плавучей буровой установки или подводного трубопровода, находящихся под влиянием дрейфующих ледовых полей и айсбергов.

Сейчас применяются два основных способа трехмерной визуализации геопространственных данных. Один из них использует методы трехмерного представления, встроенные в геоинформационные системы (ГИС). Другой для трехмерного отображения данных использует возможности стандартного Web-обозревателя или браузера – программного обеспечения на компьютере пользователя для поиска, просмотра информационных ресурсов (Web-сайтов), размещенных в Интернете.

Использование геоинформационных систем типа ArcGis 9 и выше, AutoCAD Civill (САПР) и других для трехмерной визуализации связано с большими материальными затратами на приобретение этих сложных громоздких систем и на обучение персонала. Такие программные системы поддерживают трехмерную визуализацию только в локальном режиме (на компьютере, где установлена ГИС). Для того чтобы осуществить трехмерную визуализацию с использованием сетевых каналов связи требуется приобретение и установка дополнительных программных продуктов, соответствующей ГИС – серверной и клиентской компонентов. В таких системах уже существуют наборы программных средств для простейших способов трехмерной визуализации данных. Усложнение способов визуализации требует дополнительного программирования на внутреннем языке программирования ГИС.

В отличие от ГИС использование браузера для трехмерной визуализации не требует затрат на приобретение программных средств, так как существует большое число некоммерческих программ, встраиваемых (plug-in) в ядро стандартного браузера. Браузер – это самая совершенная программа, входящая в состав стандартного набора программ для компьютера, если не считать операционной системы. В действительности это иерархическая система одновременно функционирующих интерпретаторов (парсеров – синтаксических анализаторов) различных языков программирования. Ядро браузера осуществляет синхронизированную работу этих интерпретаторов, передает в нужный момент управление требуемому интерпретатору. Браузер поддерживает два типа языков программирования: последовательный и декларативный. Последовательный язык, например, JavaScript – это последовательность команд, которые выполняются одна за другой и которые должны привести к желаемому результату. Декларативный язык – это специальный текст, декларирующий аранжировку представления и визуализации различных объектов, например, последовательность теги в HTML.

Для трехмерной визуализации (3D-визуализации) с помощью браузера в подавляющем большинстве случаев используется декларативный язык моделирования виртуальной реальности VRML (Virtual Reality Modeling Language), признанный стандартом ISO для создания трехмерных представлений сложных сцен с развитой навигацией в Интернете. Для просмотра сцены необходимо установить в браузере соответствующий plug-in. Наиболее удачными можно считать разработки фирм Cosmo Player, Vlahxun и Microsoft. Основная альтернатива – спецификация XML-языка X3D обычно является дополнением в plug-in для VRML.

В Интернете помещено большое количество информационных ресурсов с использованием VRML. Например, на сайте [1] дается анимация всего процесса подъема АПЛ «Курск».

Наиболее интенсивно трехмерное отображение геофизических полей с использованием VRML применяется в национальном агентстве геофизических исследований Австралии (GA). Как утверждается на сайте [2], открытый доступ к трехмерной визуализации геофизической информации Австралии в Интернете позволил Правительству этой страны совместно с ее жителями принять обоснованные решения об управлении природными ресурсами для обеспечения экологической безопасности и оптимизации планирования и производства добычи полезных ископаемых на суше и шельфе.

Архитектуру технологии GA можно представить в следующем виде [3]. Исходной информационной базой является набор VRML файлов. Они формируются

на этапе предобработки на основе текстовых файлов, описывающих различные характеристики геофизических полей, их координаты и т. д. Процедура конвертации текстовых файлов в файлы формата VRML проводится с помощью строкового процессора Gawk с последующим экспертным контролем и ручной коррекцией. Пространственные данные больших объемов рекурсивно двоично делятся до небольших размеров. Это делается для увеличения скорости передачи данных по сети и уменьшения требований к ресурсам компьютера, на котором осуществляется трехмерная визуализация.

Трехмерная визуализация осуществляется в браузере – с использованием языков HTML, JavaScript и VRML. Основная структура это HTML, которая включает блок JavaScript функций для обеспечения интерфейса с пользователем и VRML. Навигация изображения осуществляется стандартными средствами VRML. Основные блоки архитектуры технологии GA представлены на рис. 1.

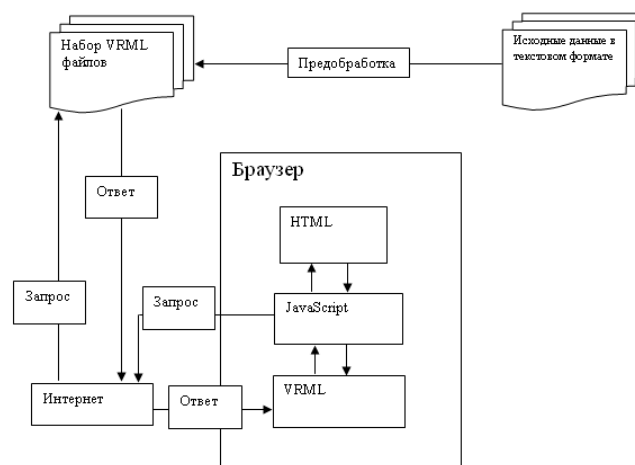


Рис. 1. Основные блоки архитектуры технологии GA трехмерной визуализации геопространственной информации

К основным недостаткам описанной технологии GA трехмерной визуализации геофизических данных следует отнести:

- отсутствие в качестве источника первичной информации базы данных ГИС-приложения;
- использование этапа предобработки по формированию множества VRML файлов и применения их ручной коррекции;
- отсутствие методов оперативного включения текущей информации в набор заготовленных VRML файлов;
- отсутствие методов визуализации геофизических данных в двумерном – картографическом виде;
- использование встроенных в интерпретатор VRML средств перемещения по виртуальному миру – vtml-навигации.

Последний пункт требует пояснения. Неудобство средств vtml-навигации интерпретатора VRML состоит в том, что пользователю предлагается полная свобода по вращению, перемещению и масштабированию трехмерного изображения. Это

практически всегда, даже у опытных пользователей, приводит к выходу (безвозвратной потере) изображения из поля зрения. Для восстановления визуализации данных приходится осуществлять перезагрузку, возвращаться в исходное состояние.

Учитывая приведенные выше недостатки технологии GA, нами была разработана новая технология трехмерной визуализации. Основные блоки архитектуры этой технологии представлены на рис. 2. Основным источником данных является база данных ГИС-приложения, например, шейп-файлы ArcView или фундаментальная сетевая база данных, например, Oracle или PostgreSQL. Последние две базы данных имеют программные модули для хранения геопространственных данных и, в первую очередь, предназначены для оперативного сбора удаленных данных. Последнее обстоятельство позволяет оперативно включать в процесс визуализации поступающую информацию от существующих систем мониторинга.

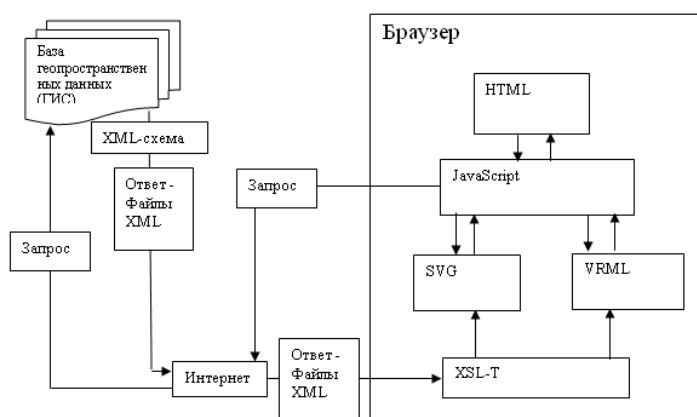


Рис. 2. Основные блоки предлагаемой архитектуры технологии трехмерной визуализации геопространственной информации

В предлагаемой технологии отсутствует этап предобработки. При необходимости визуализации требуемой области пространства данные для VRML интерпретатора формируются в оперативной памяти компьютера с последующей загрузкой в интерпретатор VRML. Это осуществляется по следующей последовательной цепочке операций.

В загрузочном VRML файле включен узел JavaScript, функции которого контролируют область видимого пространства. Если некоторая область пространства выходит из области видимости, то соответствующий блок данных выгружается из памяти интерпретатора VRML. Если же в область видимости попадает участок, для которого VRML данных нет, то генерируется запрос к базе геопространственных данных на отбор, формирование требуемой информации и ее загрузку в память интерпретатора VRML. При поступлении запроса база данных с использованием внутренних процедур в соответствии с заготовленной XML-схемой формирует XML структуру с геопространственной информацией, пересылаемую в память браузера. Эта XML структура конвертируется в памяти браузера в VRML структуру с

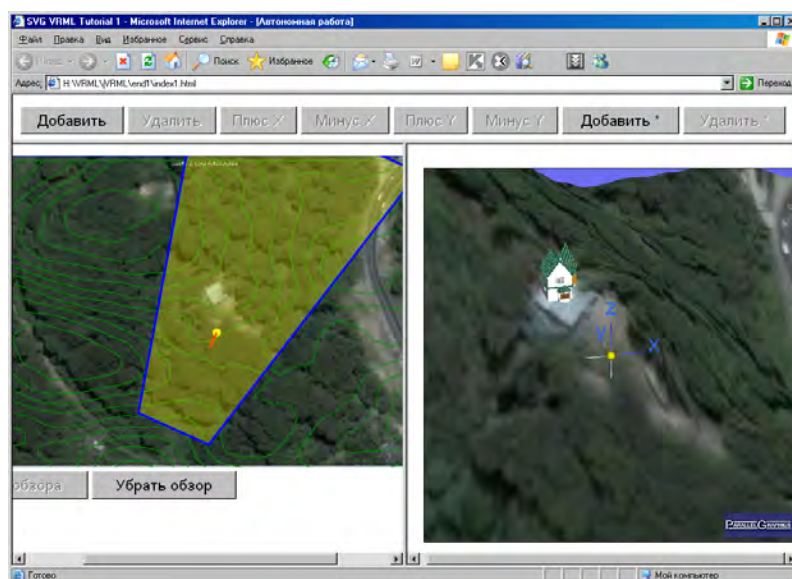
использованием скрипта языка XSLT-T. Необходимость такой довольно длинной цепочки преобразований обусловлена тем, что, с одной стороны, практически все современные базы данных имеют готовые программные модули для работы с XML данными, а с другой, – тем, что интерпретатор декларативного языка XSLT-T встроено в браузер, и у него очень большая скорость выполнения.

Способ двумерной картографической визуализации геопространственной информации необходим для лучшего контроля за местонахождением трехмерно отображаемой области. Очевидно, что масштаб визуализации таким способом на порядок меньше, чем для трехмерного. Программными инструментами для картографической визуализации служат структуры данных в формате SVG. Этот формат поддерживает векторные и растровые данные. Отображение в браузере данных в формате SVG осуществляется интерпретатором декларативного языка SVG. Визуализация картографической информации в Интернете с использованием SVG уже стало стандартом де-факто. Данные в структуре SVG формируются способом, аналогичным формированию данных в формате VRML. На основе данных в структуре XML, получаемых от базы данных по запросу, проводится конвертация в памяти браузера в структуру SVG с помощью XSLT-T.

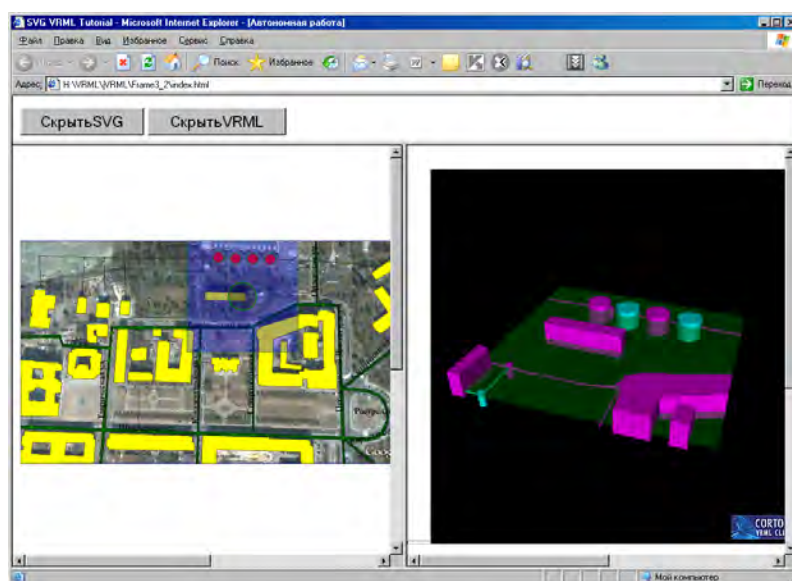
Одновременное двумерное и трехмерное представление геопространственных данных с необходимостью требует поддержки синхронизации навигации по той и другой сцене. На картографической сцене отображается прямоугольник, соответствующий текущей области пространства, данные о которой загружены в память интерпретатора VRML. Синхронизация со стороны SVG осуществляется на основе функций JavaScript, встроенных в SVG и HTML. Синхронизацию со стороны VRML сложнее осуществить. Здесь необходимо в загрузочный файл VRML включить узел JavaScript с навигационными функциями, не позволяющими трехмерному изображению выходить за рамки окна зрения и постоянно отслеживающими координаты окна зрения. Эти координаты служат необходимой информацией для синхронизации с картографической сценой, которая, к сожалению, возможна только с использованием таймера HTML. Это требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому синхронизацию со стороны VRML следует включать и выключать по требованию пользователя.

Система vtml-навигации построена с использованием альтернативного по отношению к технологии GA принципа организации точки наблюдения трехмерной сцены. В технологии GA используется стандартный принцип – точка наблюдения расположена вне сцены. При навигации сцена неподвижна, а изменяются координаты точки наблюдения и угол наблюдения. При этом центр вращения явно не определяется, что и является одной из причин потери изображения при vtml-навигации. В предлагаемой технологии используется альтернативный принцип. Точка наблюдения находится постоянно в центре окна наблюдения и визуализируется небольшим трехгранником осей, начало трехгранника всегда является центром вращения изображения. При vtml-навигации сцена перемещается относительно этого центра.

Представленная выше технология была опробована на тестовых задачах. Опытная эксплуатация показала свою вычислительную эффективность. На рис. 3 представлен пример окна браузера с реализованной технологией.



а



б

Рис. 3. Примеры трехмерной визуализации геопро пространственных данных. Двумерное картографическое изображение: слева – векторные и растровые слои участка поверхности земли в SVG формате, справа – трехмерное отображение соответствующего участка в VRML формате: а) горный рельеф со строением; б) район Санкт-Петербурга

В статье освещены только узловые принципиальные технологические моменты. Детальные структуры технологии связаны с особенностями функциональности и синтаксиса применяемых языков программирования, работы браузера и организации обмена данными по Интернет.

Рассмотренная выше технология функционирует как в сетевом, так и локальном вариантах. К недостаткам данной технологии можно отнести отсутствие возможности защитить тексты программ от копирования злоумышленниками. Это объясняется принципом открытости текстов программ запускаемых в браузере. Кроме того, можно было бы указать на трудности, связанные с плохой совместимостью различных типов браузеров. Сейчас эта проблема решается путем использования специальных библиотек функций высокого уровня для языка JavaScript.

Существует также действительно важная проблема автоматизированной генерализации геопространственных полей. Ее разрешение позволило бы резко увеличить производительность работы подобных систем. Заметим, что эта проблема не разрешена и в ГИС-приложениях. Используемый сейчас повсеместно метод рекурсивного двоичного дробления пространства не является ее решением и имеет ограничения по интервалу масштабов, для которых этот метод применим. Этот интервал зависит от конкретного набора исходных данных и не носит универсального характера. Развитие представленной в статье технологии связано с разработкой эффективного алгоритма автоматизированной генерализации геопространственных полей.

Таким образом, разработана новая архитектура трехмерной визуализации геопространственных объектов и полей, которая практически не требует материальных затрат на приобретение программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.parallelgraphics.com/kursk>
2. GEOSCIENCE AUSTRALIA 2005a, Geoscience Australia – About Us, <http://www.ga.gov.au/about/>, Web site accessed 8 February 2006.
3. Beard, D. J. 2005, Using VRML to Share Large Volumes of Complex 3D Geoscientific Information via the Web. In Web3D 2006 11th International Conference on 3D Web Technology, Columbia, Maryland, 18-21 April 2006, ACM. 163–167.

TECHNOLOGY OF 3D VISUALIZATION OF GEOSPATIAL OBJECTS AND FIELDS

E. A. Belousova

(«System» Closed-type JSC),

Y. N. Zhukov

(«GNINGI» OJSC),

V. P. Korovyakovsky

(«System» Closed-type JSC)

The technological scheme of creating the network and local software applications including the 3D visualization of the geospatial objects is considered. The specific feature of the proposed technology is that only the standard unified software included in the browsers is used.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СЪЕМКИ РЕЛЬЕФА ДНА

Э. С. ЗУБЧЕНКО
(ОАО «ГНИНГИ»)

Рассматриваются методы обработки данных съемки рельефа дна: метод с эквивалентными весами и метод, основанный на локальном моделировании поверхности морского дна регрессионным уравнением второго порядка, параметры которого минимизируют сумму квадратов остаточных погрешностей. Методы предназначены для автоматического исключения выбросов из данных измерения глубин при съемке рельефа дна многолучевыми и многоантенными эхолотами.

Возрастающие объемы данных при выполнении съемки рельефа дна с помощью современных средств съемки (многолучевых и многоантенных эхолотов, авиационных лазерных батиметрических систем) потребовали разработки автоматизированных методов их обработки, направленных на максимально возможное исключение участия оператора и его субъективной оценки данных и на сокращение времени обработки. Одно из направлений – разработка методов «очистки» измерений с целью исключения грубых промахов. Главным требованием к таким методам является то, чтобы разрабатываемые на их основе алгоритмы обеспечивали устойчивое решение задачи, и при этом не происходила потеря важной для безопасности судоходства информации. Эта задача решается на основе использования так называемых робастных (устойчивых) методов обработки данных измерений.

Актуальность задачи выявления грубых промахов подтверждается, например, тем, что при съемке рельефа дна многолучевым эхолотом из 250 млн. глубин, измеряемых этой системой за один день, около 0,5% могут быть ошибочными. Их обнаружение, анализ и исключение не может быть осуществлено без автоматизированных методов обработки. Главной проблемой при этом остается выявление грубых ошибок или выбросов. Проблема осложняется тем, что в дополнение к грубым ошибкам при съемке рельефа дна существует другой вид «неправильных» данных, то есть так называемых «истинных неправильных» данных, которые представляют фактические глубины, например, глубины над затонувшими судами и т. п. Эти данные имеют большое значение для безопасности навигации, поэтому решение об отнесении их к грубым ошибкам или к реальным глубинам остается за гидрографом.

При разработке методов автоматического исключения грубых промахов из результатов съемки исходят из определения промахов как измерений, которые значительно отличаются от остальных измерений или таких измерений, погрешности которых намного превышают случайные ошибки.

Используемые для этих целей методы можно разделить на два типа. Первый – так называемый метод статистического тестирования принимаемых гипотез.

Другой – метод, базирующийся на использовании функции интерполяции и/или стохастической оценке (коллокации) [1].

Выбросы могут приводить к некорректности результатов, получаемых стандартными методами статистической обработки. Для исключения таких случаев начиная с 1960 г., были разработаны так называемые робастные (устойчивые) методы, с целью обеспечения меньшей чувствительности статистических оценок глубин к выбросам.

Среднее выборки может быть существенно искажено единственным выбросом. Это свойство отсутствует у медианы выборки (медиана – значение центрального члена выборки, упорядоченной в порядке возрастания набора данных, до которого и за которым находится равное число членов). Значение медианы при наличии в выборке одного члена, стремящегося к $\pm\infty$, не изменится. Поэтому медиана является устойчивой к грубым ошибкам, тогда как среднее – нет. Фактически медиана допускает 50% грубых ошибок в данных прежде, чем она может измениться. В этом случае мы говорим, что «аварийная (коллапсирующая)» точка оценки медианы – 50% ошибочных измерений. Хотя нахождение среднего – оптимальная формула оценки локализации нормального распределения, однако оценка является неустойчивой: количество выбросов не должно быть более 0%, а для распределений, близких к нормальному, она может быть существенно подоптимальной.

В начале девяностых годов прошлого века обнаружение выбросов было основано на описании распределений через взвешенные значения среднего и стандартного отклонения. В дальнейшем для выявления выбросов стал использоваться метод робастной статистики. Робастный подход – метод анализа и синтеза систем управления при наличии неопределённости, используемый в современной теории автоматического управления.

Робастные методы, предназначенные для уменьшения влияния выбросов на процессы статистической оценки измерений, разрабатываются на основе принципа наибольшего правдоподобия, метода кригинга или фильтра Калмана [2].

Рассмотрим суть робастного подхода на примере оценки среднего выборки. Ставится задача получения статистически состоятельных оценок среднего μ независимых измерений Y_i с функцией плотности вероятности $f(y - \mu)$, соответствующей нормальному распределению или близкого к нему. Есть множество формул оценки центра распределения μ , включая: среднее выборки, медиану или оценку по принципу максимального правдоподобия. Из множества формул оценки центра распределения рассмотрим так называемую M -формулу оценки (далее – M -оценщик). Название происходит от названия данного принципа на английском – Maximum likelihood estimation (MLE), который был использован для оценки.

Если f – плотность вероятности случайных величин, то можно определить новую функцию $\rho = -\log f$. Тогда целевую функцию для M -оценщика запишем в виде [2]

$$\min_{\mu} \sum_i -\log f(y_i - \mu) = \min_{\mu} \sum_i \rho(y_i - \mu). \quad (1)$$

Чтобы найти μ -оценку среднего, необходимо найти производную от функции под знаком суммы (1) и приравнять ее нулю. Пусть $\rho' = \psi$ искомая производная (считаем, что эта производная существует). Тогда, приравняв производную нулю, запишем

$$\sum_i \psi(y_i - \hat{\mu}) = 0, \quad (2)$$

где ψ так называемая «функция влияния». Для придания оценочной процедуре максимальной устойчивости и эффективности специально подбирают функцию влияния $\psi(x)$ – класс ступенчатых функций действительной переменной, простейшая из которых имеет вид

$$\psi(x) = \begin{cases} x & \text{при } |x| < c; \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (3)$$

и соответствует метрическому усечению, которое позволяет практически исключить влияние выбросов на оценку.

Для автоматического обнаружения выброса необходимо установить все выбросы в указанную процентиль данных (процентили – значения, которые делят выборку данных в сто групп, содержащих в максимально возможной степени равные числа наблюдений). Например, 90%-ый W -оценщик «видел» бы все данные, квалифицируемые как данные ниже 5-й и выше 95-й процентили. С этой целью нормальные распределенные измерения ограничивают значением $\mu \pm c$, где c – постоянная величина, устанавливаемая из конкретных условий измерений.

Задача идентификации выброса относительно проста, когда наблюдения содержат единственную грубую ошибку. Но если наблюдения содержат больше чем одну грубую ошибку, задача становится более трудной вследствие «маскировки» выбросов в присутствии других, обычно смежных, ошибочных измерений. Маскировка выбросов неизбежно возникнет, особенно в случае множественных грубых ошибок.

Все использованные для исключения выбросов методы основаны на классической оценке по методу наименьших квадратов, которая, как известно, не является устойчивой: даже единственная грубая ошибка приводит к неправильной оценке. Если мы будем использовать эти искаженные оценки, чтобы строить статистическую переменную и затем делать статистическое испытание, результаты, конечно, будут ненадежны. Чтобы увеличить надежность обычных методов испытаний для обнаружения выбросов в измерениях при съемке, разработана и используется робастная оценка. Главная идея этого подхода – объединить обычное сравнительное тестирование интерполяции с робастной оценкой. Для этого применяется так называемое робастное сравнительное тестирование интерполяции, основанное на итерационной процедуре вычисления.

Преимущество робастной оценки состоит в том, что влияние грубых ошибок на оценочную функцию при выполнении решения смягчено или даже устранено в целом, хотя статистические свойства устойчивой оценочной функции ясно не определены.

Методы робастной оценки в целом могут быть трех видов. Первый – оценка типа максимального правдоподобия (M -оценка). Второй – линейная комбинация оценки порядка статистики (L -оценка), например, медиана, урезанное среднее ($trimean$) и др. Третий метод – оценка ранга (R -оценка) – робастная оценка, основанная на испытании ранга. Это статистическое испытание, использующее

статистические ранги точек данных – значения в списке, составленном, например, в порядке уменьшения величины.

Среди трех видов робастной оценки по эффективности выше M -оценка чаще всего используемая в геодезии.

Все L -оценки (минимум, максимум, среднее) являются робастными, но имеют «аварийную (коллапсирующую)» точку 0%. Аварийная точка L -оценки дается самым статистически близким порядком к минимуму или максимуму: например, медиана имеет аварийную точку 50% (максимально возможное), а n -урезанное среднее имеет аварийную точку $n\%$ [2].

Метод итерационно взвешенных наименьших квадратов (IRLS) – числовой алгоритм, предназначенный для минимизации любой указанной целевой функции, путем использования стандартного взвешенного метода наименьших квадратов. Методики для взвешенных наименьших квадратов хорошо разработаны и оптимизированы [2].

IRLS обычно используется, чтобы получить устойчивую регрессию с M -оценочной функцией, как способ смягчить влияние выбросов в наборе данных иначе, чем нормально-распределенном, например, минимизируя величину абсолютной погрешности, а не остаточные погрешности как при методе наименьших квадратов.

Примером метода обнаружения ошибочных данных, использующего IRLS, является метод с эквивалентными весами. Следуя этому методу [1], рассмотрим его суть. Запишем общее уравнение погрешностей:

$$\begin{aligned} V &= A\hat{X} - L; \\ v_i &= a_i^T \hat{X} - L_i, \end{aligned} \quad (4)$$

где \hat{X} – вектор оценок неизвестных параметров; L – вектор измерений параметра с весовой матрицей P ; V – вектор остаточных погрешностей; v_i и L_i – i -ый элемент V и L соответственно; A – матрица расчета, a_i – коэффициент в i -вой строке матрицы A , не равный нулю.

В методе M -оценки с эквивалентными весами целевую функцию записывают в виде

$$\sum_i p_i \rho(v_i) = \min, \quad (5)$$

где p_i – вес i -го измерения;

v_i – остаточная погрешность, определяемая вторым уравнением из (1) и являющаяся функцией оцениваемого значения измерения \hat{X} . Дифференцируя выражение (5) относительно неизвестного \hat{X} , получим

$$\sum_i p_i \psi(v_i) a_i = 0. \quad (6)$$

Для уменьшения влияния выбросов на оценку \hat{X} в выражении (6) произведение веса измерения на функцию влияния разделим на величину остаточной погрешности:

$$\bar{p}_i = \frac{p_i \psi(v_i)}{v_i}, \quad (7)$$

а полученную величину \bar{p}_i назовем эквивалентным весом.

Подставляя значение $p_i \psi(v_i) = \bar{p}_i v_i$ из (7) в (6), в векторном виде запишем

$$A^T \bar{P} V = 0. \quad (8)$$

Подставив в выражение (8) векторное выражение для V из выражения (1), получим

$$A^T \bar{P} A \hat{X} - A^T \bar{P} L = 0, \quad (9)$$

откуда

$$\hat{X} = (A^T \bar{P} A)^{-1} A^T \bar{P} L, \quad (10)$$

а оценку дисперсии единицы веса вычислим по формуле

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T \bar{P} V}{n - m}, \quad (11)$$

где \bar{P} – матрица эквивалентных весов. Вычисление (10) выполняется итерациями.

Предположим мы получили k -тую оценку неизвестных параметров $\hat{X}^{(k)}$ и остаточные погрешности $V^{(k)}$ тогда из уравнения (10) мы получаем $(k+1)$ -тые робастные оценки измеряемой величины

$$\hat{X}^{(k+1)} = (A^T \bar{P}^{(k)} A)^{-1} A^T \bar{P}^{(k)} L. \quad (12)$$

Устойчивость оценки (10) зависит, главным образом, от определения эквивалентных весов. Некоторые выражения для эквивалентного веса, которые были получены и модифицированы от обычных $p(v)$ и $\psi(v)$ функций, были предложены статистиками и геодезистами. Например, одна из них имеет вид, представленный следующим выражением

$$\bar{p}_i = \begin{cases} p_i & |v'_i| \leq k_0; \\ p_i k_0 [(k_1 - |v'_i|)/(k_1 - k_0)]^2 / |v'_i| & k_0 < |v'_i| \leq k_1; \\ 0 & |v'_i| > k_1, \end{cases} \quad (13)$$

где $v'_i = \frac{v_i}{\sigma_i}, \quad \hat{\sigma}_i^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{p_i};$

$\hat{\sigma}_0^2$ – оценка дисперсии единицы веса.

Принимается, что $k_0 = 1-1,5$, а $k_1 = 2-3$.

Используемый тест робастного интерполяционного сравнения осуществляется как трехступенчатый процесс, в ходе которого сначала каждое «сырое» измерение становится сравниваемой величиной. Затем выполняется сравнение измерения относительно робастного взвешенного среднего значения соседних наблюдений, взятых по соседству от точки сравнения. И, наконец, чтобы принять или отклонить измерения, используется вычисляемый критерий.

В соответствии с уравнением (12) выражение для робастно взвешенного среднего значения для итерационной вычислительной процедуры может быть представлено в виде

$$\hat{X}^{(k+1)} = \frac{\sum_i \bar{p}_i^{(k)} L_i}{\sum_i \bar{p}_i^{(k)}}, \quad (14)$$

где L_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – измерения, взятые по соседству со сравниваемым измерением L_p .

Первоначальные веса p_i ($i = 1, 2, \dots, n$), используемые для вычислений по формуле (13), определяются из выражения

$$p_i = 1/(d_i + \varepsilon)^2, \quad (15)$$

где d_i – расстояние от точек измерения до сравниваемой точки;

ε – постоянная (в расчетах принимается равной, например, 0,01).

Учитывая, что в случае измерения, содержащего грубую ошибку, свободный член уравнения погрешности возрастает, соответствующий эквивалентный вес, вычисляемый по формуле (13), будет уменьшаться. Это означает, что влияние промаха на интерполяцию будет уменьшаться, если даже измеренная точка очень близка к анализируемой точке.

При $|v_i| > k_1 \hat{\sigma}_i$; $\bar{p}_i = 0$ измерение, содержащее большую ошибку, не влияет на интерполяцию.

Если принять что \hat{X}_p – значение, которое сходится к величине, вычисляемой по формуле (14), а L_p – соответствующее сравниваемое измерение (которое не участвует в вычислении \hat{X}_p), тогда остаточная погрешность оценки есть

$$\Delta L_p = \hat{X}_p - L_p.$$

Абсолютное значение ΔL_p используется для принятия решения относительно L_p , базируясь на сравнении $|\Delta L_p|$ и критического значения или допуска ΔL_{\max} . Величина ΔL_{\max} зависит от точности измерений и совершенства интерполяционной модели. На практике эта величина принимается равной двум – трем значениям стандартного отклонения измерений параметра.

Для выявления аномальных значений измеренного параметра необходимо определить его начальное значение. В рассматриваемом методе за начальное значение принимается медиана выборки измеренных значений L_i

$$\hat{X}^0 = \text{med}_i \{L_i\}. \quad (16)$$

Значение параметра $\hat{\sigma}_0^{(k)}$ для вычисления по формуле (13) рассчитывается следующим образом:

$$\hat{\sigma}_0^{(k)} = \frac{\text{med}_i \left\{ \sqrt{p_i} |v_i^{(k)}| \right\}}{0,6745}. \quad (17)$$

Предложенный метод используется для автоматического выявления аномальных измерений глубины.

Другой метод очистки данных съемки рельефа дна основан на локальном моделировании поверхности морского дна регрессионным уравнением второго порядка, параметры которого минимизируют сумму квадратов остаточных погрешностей [3, 4]. При этом для определения оптимального размера области оценки применяется иерархический подход. Динамическое построение алгоритма аналогично одному из «спусков» квадродерева по правилам декомпозиции, построенных на оценках статистических и пространственно-временных свойств, выводимых из реальных наборов данных.

Процесс обработки, включенный в автоматические алгоритмы, может быть разделен на три основных шага:

- оценка(ки) глубины в данном местоположении;
- оценка качества используемого метода оценки;
- использование решающих правил для установления статуса глубин.

Из-за погрешностей измерительной системы глубины имеют случайное распределение относительно истинного морского дна, которое рассматривают как гауссовский вероятностный процесс с нулевым средним и стандартным отклонением σ . Грубые ошибки, встречающиеся в наборах данных от эхолота, прибывают от другого вероятностного процесса с неизвестными характеристиками. Полагая, что рельеф морского дна может быть локально описан аналитической моделью, робастные методы интерполяции позволяют идентифицировать выбросы как глубины, не удовлетворяющие этой модели.

Принимаемая аналитическая модель выражает глубину z в точке с координатами (x, y) как полиномиальную функцию $z = f_p(x, y; a)$, где p – порядок многочлена; x, y – координаты измеренной глубины; a – вектор коэффициентов модели.

Практически, p устанавливается равным 2 или 3. Цель состоит в том, чтобы представить ряд точек $p_i = (X_i, Y_i)$ $i = 1, 2, \dots, N$ посредством класса функций, определенных уравнением нелинейной регрессии [3]

$$y = a_5 x_1^2 + a_4 x_2^2 + a_3 x_1 x_2 + a_2 x_1 + a_1 x_2 + a_0 = A \cdot X, \quad (18)$$

в котором y – моделируемая глубина; x_i ($i = 1, 2$) – координаты глубины.

Чтобы принять во внимание характерную неопределенность в измерениях, мы говорим, что каждой фиксированной точке $X_i = (x_1, x_2)$ соотносится случайная величина Y_i . Пусть в результате измерений мы получили выборку размером N независимых случайных величин Y_i . Если случайные величины подчинены нормальному закону распределения Гаусса, то для нахождения коэффициентов регрессии используется аппарат метода наименьших квадратов. Пусть случайные

величины Y_i подчинены какому-нибудь другому закону распределения вероятности. После подстановки координат измеренной глубины y_i в уравнение регрессии (18) с первоначально установленными значениями коэффициентов, получим моделируемое значение глубины $y(X_i)$. По аналогии с уравнением (18) для остаточной погрешности моделирования запишем

$$r_i = y_i - y(X_i). \quad (19)$$

Оптимальное значение коэффициентов преобразования найдем, минимизируя целевую функцию остаточных погрешностей

$$\sum_{i=1}^N \rho[y_i - y(X_i)]. \quad (20)$$

Как и в предыдущем случае, для ослабления влияния выбросов в измерениях в данном методе вводится масштабный коэффициент, равный среднеквадратической погрешности измерений

$$\frac{r_i}{\sigma_i} = \frac{y_i - y(X_i)}{\sigma_i} = x, \quad (21)$$

где σ_i – масштабный коэффициент, связанный с измерением Y_i . Тогда, чтобы минимизировать целевую функцию с новой переменной (21)

$$\sum_{i=1}^N \rho\left(\frac{r_i}{\sigma_i}\right), \quad (22)$$

где функция $\rho\left(\frac{r_i}{\sigma_i}\right)$ – функция «стоимости», которая должна быть непрерывной, симметричной, и иметь единственный минимум, равный 0, дифференцируя функцию стоимости, найдем функцию влияния ψ

$$\psi(x) = \frac{d}{dz} \rho(x). \quad (23)$$

Теперь будем решать задачу оценки параметров модели рельефа – коэффициентов нелинейной регрессии (18). Для этого рассмотрим область съемки, содержащей M измеренных глубин $z_i(x_i, y_i)$ $i = 1, \dots, M$.

Пусть \hat{z}_i^j будет глубиной, оцененной с помощью уравнения (18) на итерации j , которая минимизирует остаточную погрешность, вычисленную как разность между взвешенной наблюдаемой глубиной $w_i^{(j-1)} z_i$ и предсказанной глубиной \hat{z}_i^j . Для вычисления веса используется «бивесовая» функция влияния Тьюки, которая для рассматриваемого случая может быть представлена в виде [4]

$$\begin{cases} w_i^{(j)} = \left[1 - \left(\frac{r_i^{(j-1)}}{\alpha \cdot \hat{\sigma}^{(j-1)}} \right)^2 \right]^2 & \text{при } |r_i^{(j-1)}| < \alpha \cdot \hat{\sigma}^{(j-1)}, \\ w_i^{(j)} = 0 & \text{в других случаях} \end{cases}, \quad (24)$$

где $r_i^{(j-1)} = \hat{z}_i^{(j-1)} - z_i$ – остаточная погрешность моделирования глубины с помощью уравнения (18) на предшествующей итерации;

α – масштабный коэффициент, устанавливаемый оператором.

Как следует из выражения (18), коэффициент α адаптирует вес анализируемого измерения, масштабируя стандартное отклонение $\alpha \times \hat{\sigma}^{(j-1)}$. Оценка стандартного отклонения гауссовского вероятностного процесса выполняется путем робастной L -оценки стандартного отклонения гауссовского шума: например, с помощью MAD-оценщика (абсолютная величина отклонения от медианы – аргумент функции влияния). Если среднее из остаточных погрешностей – близко к нулю, оцениваемое значение стандартного отклонения гауссовского шума дается величиной $\hat{\sigma}^{(j-1)} = 1,48 \text{ med}_i \left(|r_i^{(j-1)}| \right)$. На каждой итерации производится оценка стандартного

отклонения, а затем превычисление веса $w_i^{(j)}$ по формуле (24). Начальные веса обычно устанавливаются равными 1: $w_i^{(0)} = 1$. Взвешивающая функция позволяет присвоить статус каждой анализируемой глубине. Применение L -оценщика для оценки среднего повышает устойчивость решения. Чтобы ограничивать маскирующий эффект грубых ошибок, вводится шаг инициализации, что соответствует моделированию поверхности дна в окрестности $N_G(i)$, определенной вокруг каждой глубины плоскостью. Эта окрестность определена как 3×3 ячейки в сети представления точек измерения глубин. Т. е. начальное значение средней глубины оценивается как $\hat{z}_i^{(0)} = \text{med}_{j \in N_G(i)} (z_j)$, а начальный вес $w_i^{(0)}$ устанавливается в

зависимости от остаточной погрешности $r_i^{(0)} = \hat{z}_i^{(0)} - z_i$. Начальная точка отклонения устанавливается, чтобы отклонить 5 последних процентилей. Таким образом, 95-ая перцентиль – значение (или метка), выше которого могут находиться 5% абсолютных остаточных погрешностей $|r_i^{(0)}|$, выстроенных в увеличивающемся порядке. Придание каждой глубине веса w_i с учётом вероятности измеряемой глубины, чтобы она соответствовала гауссовскому закону распределения, позволяет отнести глубины в один из классов:

- первый – глубины с непустым весом. Эти глубины используются, чтобы оценить параметры модели. Они должны следовать гауссовскому закону распределения с более высокой вероятностью, поскольку их веса имеют тенденцию стремиться к 1;
- второй – выбросы – глубины, вес которых равен 0. Процесс идентифицирует их как образцы не гауссовского шума.

Процесс оценки заканчивается оценкой нормы $\hat{\tau}$ выбросов и оценкой $\hat{\sigma}$ – стандартного отклонения гауссовского шума, которое определяет

подтверждаемые алгоритмом глубины. Данный алгоритм за исключением внутреннего параметра, вводимого, чтобы гарантировать конвергенцию процесса, требует установки только двух параметров: фактора чувствительности α и размера L анализируемой области. В нормальных условиях внутренний параметр может быть установлен равным теоретической величине σ , которая оптимизирует гауссовскую оценку при отсутствии выбросов.

Подход, описанный выше, неявно основан на предположении о том, что рельеф дна в анализируемой области может быть аппроксимирован полиномом второго или третьего порядка, принимая во внимание априорно приемлемый шум. Чтобы быть более гибким, и минимизировать риск, возникающий вследствие установки неправильных параметров модели, начальный подход должен быть обобщен включением в алгоритм решения задачи определения оптимального размера ячейки L для каждой части области съемки. При этом должны быть учтены два следующих противоположных требования: более крупные ячейки улучшают статистические критерии, используемые для классификации глубины; с другой стороны, размер ячейки должен быть ограничен для сложного рельефа дна, чтобы гарантировать адекватность квадратической модели. Иначе действительные глубины будут интерпретированы как выбросы вследствие больших величин остаточных погрешностей модели. Это причина, по которой анализируемая область разбивается на элементарные ячейки путем последовательного деления предыдущей ячейки на четыре ячейки меньших размеров – так называемый принцип построения квадродерева. Применяемый для этого подход «спуска», состоит в том, что анализируемая область делится до тех пор, пока модель не станет адекватно представлять морфологические детали рельефа морского дна. Для данной области процесс деления прекращается, как только правила, устанавливаемые некоторой рабочей гипотезой, будут подтверждены. Таким образом, главная трудность состоит в том, чтобы определить надежные правила, которые позволяют оценивать адекватность принимаемой модели. Стратегия декомпозиции анализируемой площади основана на двух принципах:

- самое лучшее разделение области съемки определяется с помощью регулярной двухмерной сетки квадратных ячеек, размеры которых устанавливаются равными L_0 ;
- первичные ячейки пригодны вместе, чтобы строить иерархическое разделение, составленное из $n = 1, \dots, N$ уровней (т. е. в этой структуре дерева квадрантов материнская ячейка разделена на четыре дочерних ячейки равных размеров). Уровень разделения $n = 1$ определяется как сетка ячеек размером L_0 . Размер ячеек на уровне разделения n равен $L_n = 2^{n-1} L_0$.

Эта адаптивная процедура вводит только два новых параметра: L_0 – размер ячейки первичной сетки и N – число уровней иерархического разделения.

Пусть M_0 – минимальное число глубин, требующихся для робастной оценки параметров модели, приспособленной к данной области съемки. L_0 может быть выведено опытным путем из особенностей статистического распределения глубин. Приблизительное значение для L_0 должно быть предложено оператором. Число иерархических уровней не является критическим, так как лишние уровни будут ограничены продолжительностью обработки – из-за бесполезных оценок, выполняемых на более высоких уровнях.

С целью сосредоточить внимание оператора на спорных областях, где гипотеза алгоритма не может быть подтверждена, алгоритм формирует так называемую «карту уровня доверия», назначение которой состоит в том, чтобы идентифицировать данные области и осуществлять систематический контроль его результатов, который является требованием, связанным с точкой зрения гидрографа.

Вид карты уровня доверия представлен на рис. 1 [4].

Правила, используемые, для обоснования автоматического принятия решения об отклонении измерений и управления обоснованностью выбора параметров модели, основаны на информации, исходящей от устойчивого моделирования рельефа морского дна текущей анализируемой области. В случае, когда принятые правила не позволяют принять отклоняющее решение, анализируемая ячейка будет разделена на четыре дочерних ячейки следующего иерархического уровня, и каждая из них будет подвергнута анализу. В противном случае анализ области будут рассматривать как завершенный. Решающие правила учитывают несколько аспектов:

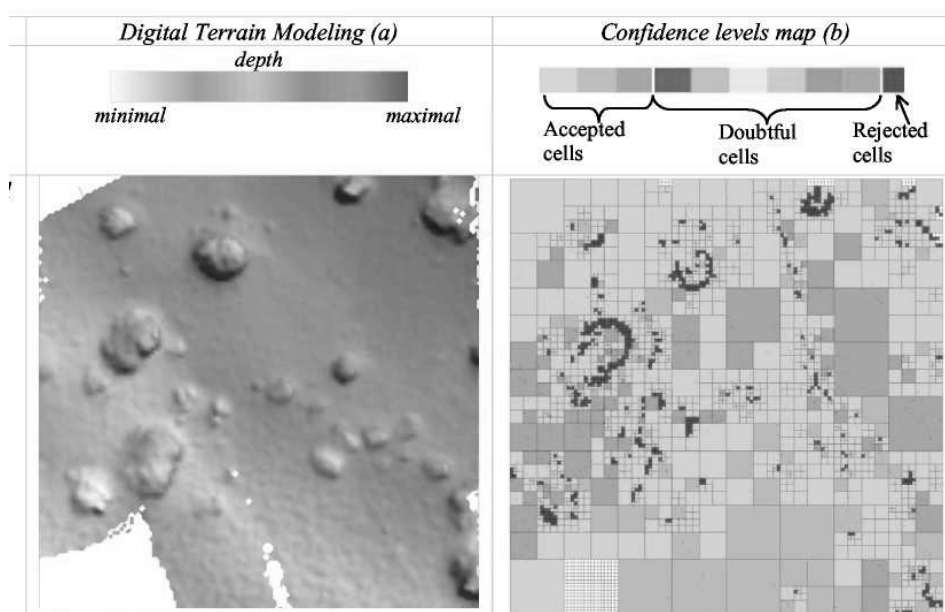


Рис. 1. Вид карт уровня доверия (b), получаемых в результате автоматической постобработки реальных наборов данных, на которых показана локализация спорных областей, где принятая гипотеза о допустимой величине выброса не подтверждается алгоритмом (a – цифровая модель рельефа дна, rejected cells – исключенные ячейки, doubtful cells – ячейки, вызывающие сомнение, accepted cells – принятые ячейки)

- статистические аспекты, основанные на оценках $\hat{\sigma}$ и $\hat{\tau}$, которые соответственно представляет среднеквадратичное отклонение и соотношение выбросов к общему количеству измерений;
- временные аспекты, которые сопутствуют анализируемым глубинам, получаемым при съемке многолучевым эхолотом;

– пространственные аспекты, которые учитывают размер и распределение групп обнаружений выбросов.

Необходимое и достаточное условие перевеса над отклонением текущей оценки – то, что, по крайней мере, одно из пяти решающих правил аннулирования (отмены) выполнимо. Эти правила предполагают, что каждая предыдущая проверка правила дала отрицательный результат.

Правило I основывается на глубинах, подтвержденных текущим моделированием, и дает положительный ответ (т. е., что данная глубина не является выбросом), если среднеквадратичное отклонение шума $\hat{\sigma}$ больше чем априорно определенное значение $\hat{\sigma}_{\max}$.

Правило II дает положительный ответ, если соотношение $\hat{\tau}$ выбросов больше, чем максимальное соотношение $\hat{\tau}_{\max}$, принятое для нормального распределения погрешностей измерений.

Правило III имеет дело с относительным размером кластеров выбросов. Когда аналитическая модель не соответствует рельефу морского дна, глубины, идентифицированные с помощью M -оценщика как выбросы, группируются в кластеры. Это правило предназначено для идентификации кластеров выбросов. Расположение кластеров означает обнаружение связанных компонентов. Другими словами, это означает введение ориентированного графа между глубинами (ориентированный граф G – это упорядоченная пара $G: = (V, A)$, для которой выполнены следующие условия: V – множество вершин или узлов, A – множество упорядоченных пар различных вершин, называемых дугами или ориентированными ребрами. Дуга – это упорядоченная пара вершин (v, w) , где вершину v называют началом, а w – концом дуги), так как это действует на «облака точек» такой сети, которые не были возвращены по предыдущим правилам.

Объединение обнаруженных отклонений в кластеры требует принять во внимание временные и пространственные связи. Временной аспект учитывает момент каждого измерения по их номерам луча и посылки. Из-за навигационных аспектов (влияния рыскания и крена) пространственная близость глубин может быть принята за временную связь.

Её учет позволяет вводить виртуальные глубины, соответствующие пропускам измерений эхолотом и тем самым ускорять построение существенно связанных компонентов.

Алгоритм, который строит связанные компоненты, использует рекурсивную процедуру, основанную на методе распространения фронта в графе смежности.

Процесс создания кластера изображен на рис. 2 [4]. Кластеры обнаруженных глубин сначала построены на основе связи, неявно определяемой принципом измерения глубин эхолотом (получение глубин в каждой посылке зондирующего импульса). Как упомянуто выше, узлы этого графа включают пропущенные глубины.

В течение процесса построения связанных компонентов некоторые из этих виртуальных узлов вносят такой же вклад, как и глубины, полученные моделированием. С этой целью, виртуальные узлы, которые расположены на дугах меньше чем d_v (число дуг (ребер) во временном графе, описывающем радиус влияния данной глубины) от самой близкой обнаруженной аномальной глубины, временно также маркированы как «обнаруженный выброс глубины». Принимая во внимание

трудности, с которыми сталкиваются при измерении глубин с помощью МЛЭ, установлены типы кластеров, формируемые в течение съемки.

На втором шаге обнаружения выбросов аномальные глубины, маркированные согласно их принадлежности к связанным компонентам, сравниваются с ЦМРД, построенной для текущей анализируемой области.

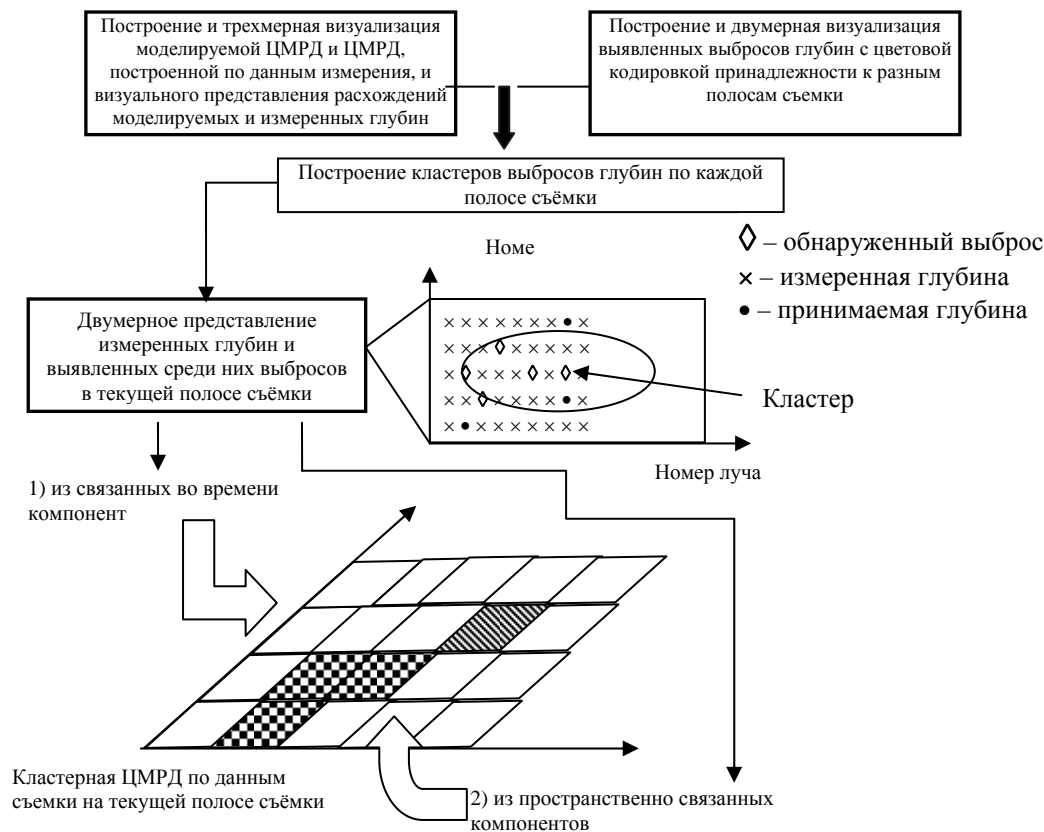


Рис. 2. Построение кластеров обнаруженных выбросов глубин

Единственная цель построения такой ЦМРД состоит в том, чтобы представить пространственную связь, которая потенциально расширяет предыдущие кластеры. Разрешение ЦМРД l_0 определено как дробная часть размера ячейки первичной сетки L_0 . На этом шаге, как и на предыдущем, глубины, принадлежащие различным полосам, не связываются. Это правило даст положительный ответ (отменить принятое решение на предыдущем шаге анализа предъявленной глубины), если в кластере присутствует больше обнаружений выбросов, чем величина A_{max} . Кластеры, определенные выше, создаются на основе временных и пространственных отношений, установленных между глубинами той же самой полосы съемки.

Правило IV применяется, если на анализируемую область попадают глубины из различных полос съемки. Это правило использует возможные пространственные совпадения, которые могут существовать между кластерами, построенными на данных из различных полос съемки. Кластеры обнаружений выбросов глубин из различных полос, которые частично согласованы, показывают либо наличие объекта,

либо ошибку моделирования, и то, и другое требует более детального анализа. Правило даст положительный ответ, если, по крайней мере, два кластера являются перекрывающимися.

Правило V применяется, если предыдущие правила не отменили моделирование с установленными параметрами рельефа дна и если все созданные кластеры содержат количество обнаруженных выбросов глубин меньше, чем A_{\max} . Таким образом, поскольку сформированные кластеры не пересекают кластеры, принадлежащие другой полосе, модель не должна быть отклонена. С другой стороны, кластеры, принадлежащие областям вне пересечения, все еще сомнительны. Тогда нужно отклонить модель всякий раз, когда такие кластеры значимого размера существуют, потому что они могут потенциально представлять наличие на дне объекта.

Это правило даст положительный ответ, если, по крайней мере, хотя бы один сомнительный кластер, размеры которого больше, чем A_{\min} , будет существовать.

Параметры алгоритма обнаружения выбросов глубин можно отнести к трем типам: те, которые управляют иерархическим разделением анализируемой области, те, которые управляют устойчивым моделированием, и, наконец, те, которые подтверждают моделирование.

Параметры N , M_0 , L_0 управляют разделением анализируемой области на N иерархических уровней. Величина данного параметра устанавливается с избытком (обычно – 10). M_0 – минимальное количество глубин, содержащееся в первичной ячейке дерева квадрантов. Его значение теоретически определено степенями свободы принимаемой модели регрессии: 6 в случае полиномиальной модели второго порядка и, соответственно, 10 для третьего порядка. Практически, работая с моделью второго порядка, M_0 устанавливают равным 10 глубинам, чтобы гарантировать минимальную избыточность, соответствующую модели.

L_0 – размер ячеек первичной сетки. Если может быть сделана оценка среднего расстояния l_0 между глубинами, предполагаемая величина L_0 вычисляется, с учетом ограничения величиной M_0 .

Параметр α – настраиваемая постоянная, которая определяет масштаб адаптивной точки отклонения M -оценочной функции и определяет устойчивое моделирование. При отсутствии выбросов или недостатков модели, ее теоретическое и оптимальное значение равно 7. Исходя из требований очистки увеличение этого значения, минимизирует соотношение выявленных выбросов к общему числу ошибок и, наоборот, ее уменьшение будет максимизировать это соотношение.

Параметры σ_{\max} , τ_{\max} (соответственно, A_{\min} , A_{\max} , d_v) – статистическое (соответственно, пространственно-временное) подтверждение моделирования; σ_{\max} – максимальная величина среднеквадратичного отклонения шума, характеризующего «правильные» глубины. Это значение установлено относительно априорной оценки точности датчика или априорной оценки обработки (типичное значение критерия, определено стандартом съемки рельефа дна S-44).

Параметр τ_{\max} – максимальное соотношение выявляемых ошибочных глубин. Принимаемое значение основано на допустимом соотношении выбросов в нормальном распределении глубин съемки. Как и предыдущий, этот параметр устанавливается на основе характеристик эхолота (типовое значение – 5%).

Параметр A_{\min} – минимальное число отсчетов, принадлежащих связанному компоненту, которое позволяет маркировать их как кластер (типичное значение – 3).

Параметр A_{\max} – максимальное число отсчетов, принадлежащих связанному компоненту, которое позволяет маркировать кластер как объект на дне (типичное значение – 9 глубин). Параметр d_v позволяет выбирать временные виртуальные узлы как обнаружение при создании кластера (типичное значение – 1). Фактически, единственными параметрами, требующими особого внимания, являются σ_{\max} , τ_{\max} (их величины представляют условия съемки), и параметры A_{\min} , A_{\max} , установка которых неявно передает морфологические детали, на что необходимо обратить внимание оператора.

Рассматриваемый алгоритм обеспечивает отображение вместе со множеством подтвержденных глубин и результатов процесса очистки. Это позволяет использовать автоматическую процедуру, фокусируя внимание оператора на спорных областях, которые обычно вызваны или присутствием объектов на дне, или недостатками модели. Чтобы классифицировать анализируемые области съемки в зависимости от числа обнаружений и содержащихся полос съемки, используется таблица условных обозначений (таблица цветов) ячеек, отнесенных к различным кластерам. Такая таблица [4], вид которой показан ниже, позволяет отличить два типа таких областей. Первый – области, отклоненные по правилам I или II (таблица, случай 10). Второй – области, маркированные как сомнительные по правилам III, IV или V (таблица, случаи 4–9). Оператор должен систематически контролировать области первого типа, поскольку они потенциально могут содержать выбросы, которые не были обнаружены. Этот тип также включает области, которые не были достоверно проанализированы из-за недостаточного числа глубин (т. е. меньше, чем M_0). Области второго типа, маркированные как сомнительные по правилам III, IV или V, могут требовать ручной проверки. Имея в виду, что основная цель алгоритма состоит в том, чтобы упростить задачу оператора, необходимо определить точную классификацию кластеров. С одной стороны, эта классификация идентифицирует области согласно их содержанию (то есть кластер, объект или суперпозиция кластеров), и с другой стороны, согласно знаку величины остаточной погрешности данного выброса. Кроме того, множество обнаруженных выбросов глубин, прикрепленных к этим областям, должны быть сверены с порогом прежде, чем быть представленными оператору. Порог детектирования S_{det} построен из вычисленного соотношения выявления выбросов для каждой глубины по результатам предыдущих оценок N .

Автоматическая идентификация и классификация сомнительных областей позволяют оператору локализовать кластеры, потенциально отображающие объекты на дне.

Рассмотренный метод и алгоритм очистки данных подтверждены на массивах данных съемки с помощью многолучевых эхолотов в мелководных и глубоководных морских акваториях и показали высокую эффективность [4].

Условные обозначения на «карте уровня доверия» для ячеек площади съемки, отнесенных к различным кластерам и критерии формирования кластера

Статус ячейки	Обозначение (цвет ячейки на карте доверия)	Характеристика кластера
Принятые ячейки		Число выбросов меньше, чем необходимо, чтобы определить кластер (1)
		Нет выявленного кластера, данные с одной полосы (2)
		Включает данные более чем с одной полосы, нет пересекающихся кластеров. Нет кластеров, содержащихся в проверенной зоне (3)
Сомнительные ячейки		Кластер выявлен – величины остаточных погрешностей меньше оцененной поверхности (4)
		Кластер выявлен – величины остаточных погрешностей больше оцененной поверхности (5)
		Объект выявлен – величины остаточных погрешностей меньше оцененной поверхности (6)
		Два пересекающихся – кластера остаточные погрешности ниже оцененной поверхности (7)
		Два пересекающихся кластера – остаточные погрешности выше оцененной поверхности (8)
		Объект выявлен – величины остаточных погрешностей больше оцененной поверхности (9)
Отклоненные ячейки		Соотношение количества выявленных выбросов или оцененное стандартное отклонение являются ненормально высокими (10)

ЛИТЕРАТУРА

- Huang Motao, Zhai Guojun, Wang Rui et al. Robust method for the detection of abnormal data in hydrography // International Hydrographic Review, – 1999. – Т. LXXVI. – № 2. – С. 93–101.
- Ripley B. D. Robust Statistics // Дисс. на соискание степени магистра наук по специальности «Прикладная статистика» 2004/
http://lagis-vi.univ-lille1.fr/~lm/classpec/publi_classif/robust.pdf.
- Debes N. Use of a Robust Estimator for Automatic Detection of Isolated Errors Appearing in the Bathymetry Data // International Hydrographic Review. – 2001. – Т. 2. – №. 2. –С. 32–44.
- Debes N. Multibeam Echosounder Data Cleaning Through an Adaptive Surface-based Approach // Proceedings of US HYDRO 2007/http://www.thsoa.org/hy07/02_01.pdf.

MODERN METHODS OF PROCESSING THE BOTTOM RELIEF SURVEY DATA

E. S. Zubchenko
(«GNINGI» OJSC)

The methods of processing the bottom relief survey data are considered: the method with equivalent weights and the method based on the local modeling of the sea bottom surface using the regression equation of the second order whose parameters minimize the sum of the residual errors squared. The methods are intended for the automatic elimination of blunders in the depth measurements when surveying the bottom relief by the multibeam and multitransducer echosounders.

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ОКЕАНОГРАФИЯ

ГРНТИ 78.21.

БЛУЖДАЮЩИЕ ВОЛНЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ

С. И. МАСТРЮКОВ
(ОАО «ГНИНГИ»)

Обобщены сведения о блуждающих волнах, или волнах-убийцах в океане, их влиянии на безопасность мореплавания, выявлены проблемы обеспечения проектантов судов и гидротехнических сооружений, а также судоводителей информацией о волнах-убийцах, сформулированы направления совершенствования климатического обеспечения информацией об этом явлении.

Одной из серьезных проблем, волнующих в последние годы как океанологов, так и всех специалистов, занимающихся освоением океана, связана с так называемыми блуждающими волнами, или волнами-убийцами [1].

Морской справочник [2] дает следующее определение такого рода волнам: Кейпроллер – необычная гороподобная одиночная волна, так называемая волна-убийца, встречающаяся у юго-восточного побережья Африки между мысом Доброй Надежды и Мозамбикским проливом. Характерная особенность волны – необычайно крутой передний склон и пологая ложбина, высота волны достигает 15–20 м при относительно спокойном море. Особенно опасны такие волны между Дурбаном и Ист-Лондоном.

Сейчас, однако, установлено, что это не такое редкое и более того не аномальное и не локальное явление. Особенно опасны такие гигантские волны для крупных судов, поскольку последние имеют длину, соизмеримую с длиной этих волн, и длинные суда, находясь на гребне волны, разламываются пополам под силой собственного веса.

В англоязычной литературе для обозначения необычных ветровых волн используется много терминов: wave-killer (волна-убийца); freak (блуждающие), rogue waves (волны-изгои), abnormal (ненормальные), giant (гигантские), asymmetric (несимметричные), rabid-dog waves (волны бешеной собаки). Первое историческое название волн – кейпроллеры (cape – мыс, roller – волна, бурун), связано с местом их частого проявления у юго-восточного побережья Африки – за мысом Доброй Надежды. Ниже, следуя Е. Пелиновскому, мы будем называть все эти волны фриками (блуждающими волнами), поскольку этот термин лучше всего отражает их природу волн.

Наглядное представление об этом явлении дает фотография (рис. 1), заимствованная из работы Е. Н. Пелиновского и А. В. Слюняева [1].



Рис. 1. Фотография волны, сделанная у мыса Ольга (юг Кроноцкого п-ова, Камчатка) В.Соколовским в июне 2006 г. [1]

Стимулом к интенсивному изучению этих волн явились многочисленные аварии крупных судов и потеря полупогружной буровой платформы «Ocean Ranger» в районе Большой Ньюфаунлендской банки (БНБ) и гибель там 84 человек [3–9]. Рассмотрим географический аспект проблемы.

Видимо, впервые обобщение сведений об аварийных случаях, вызванных встречей судов с фриками высотой более 15 м, было сделано капитаном Мэллори в 1973 г. [7] для юго-восточного побережья Африки. Места одиннадцати судовых аварий, происшедших за период с 1952 по 1973 гг. представлены на рис. 2, там же приведено место аварии танкера-рефрижератора «Таганрогский залив» [8].

Обратим внимание, что практически все аварии у юго-восточного побережья Африки произошли вблизи изобаты 200 м – на стрежне Агульсцова течения, достигающего скорости одного и более м/с.

Позже, в работе [9] Г. Лоутон обобщил данные о встрече супертанкеров с волнами-убийцами за период 1969–1994 гг. по акватории Атлантического и Тихого океанов. За 30 лет в этих океанах в результате встреч с неожиданно большими волнами 22 супертанкера были потеряны или существенно повреждены, при этом погибло 525 человек. Места аварий приведены на рис. 3.

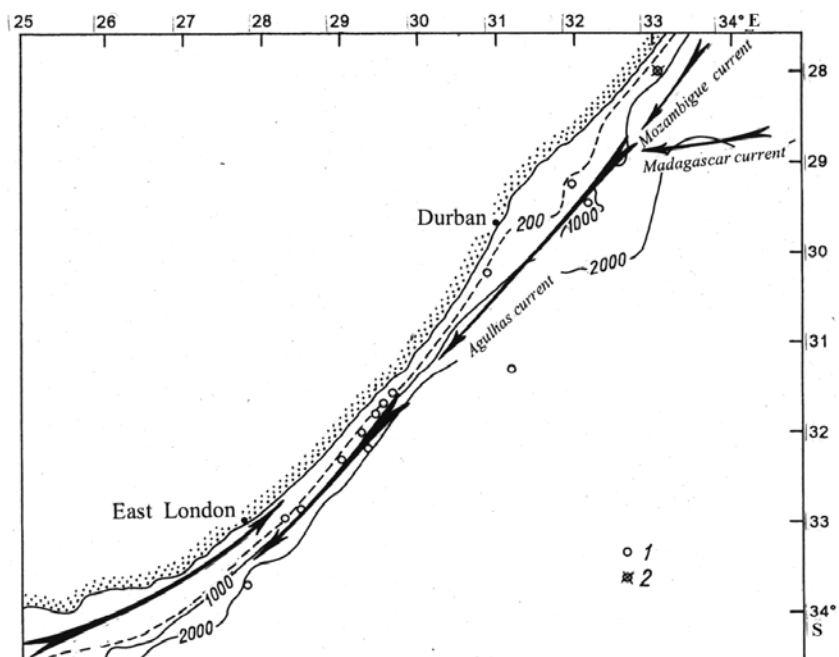


Рис. 2. Места судовых аварий в результате встречи с кейпроллерами за период 1952–1973 гг. (1) и место аварии танкера «Таганрогский залив» (апрель 1985 г.) [8]

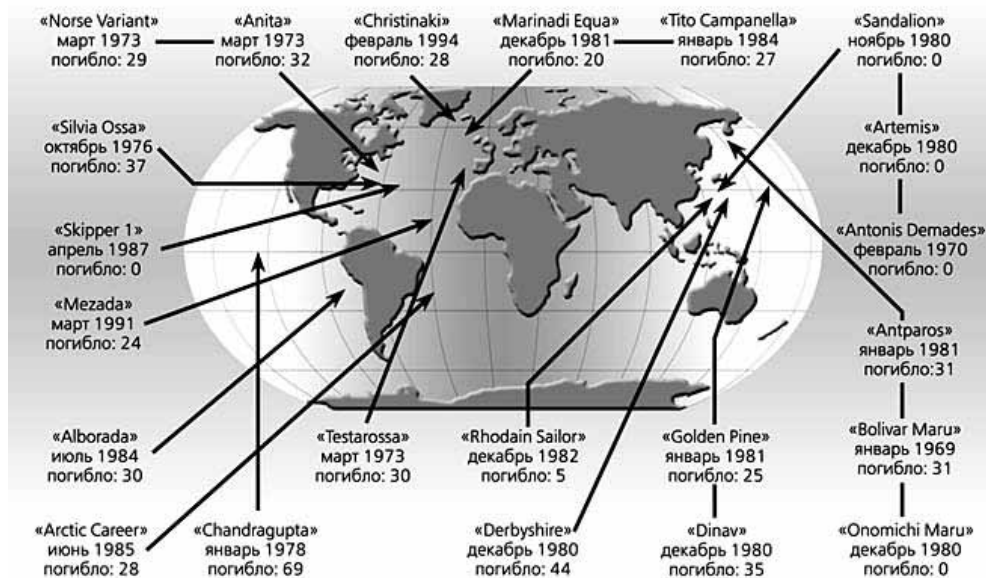


Рис. 3. Статистика встреч супертанкеров с волнами-убийцами за 1968–1994 гг. [9]

П. Кельдсен [5, 6] обобщил сведения о местах воздействия необычно высоких волн на грузовых и рыболовных судах, пассажирские лайнеры, а также на объекты морской инфраструктуры. В таблице приведены полученные им данные о районах океана, наиболее опасных в отношении фриков [5, 6].

Районы, где волны–убийцы встречаются наиболее часто [5,6]

№	Район	№	Район
1	Большая Ньюфаунлендская банка	10	Восточное побережье США
2	Прибрежная зона к югу от Гренландии	11	Прибрежная зона к востоку от Японии
3	Прибрежная зона Исландии	12	Районы, прилегающие к мысу Горн
4	Прибрежная зона Фарерских островов	12	Юго-восточное побережье Африки
5	Прибрежная зона Норвегии	14	Бенгальский залив
6	Северное море	15	Японское море
7	Балтийское море	16	Мексиканский залив
8	Бискайский залив	17	Прибрежные воды Австралии
9	Средиземное море	18	Великие озера

В работе [9] описаны несколько последних случаев встречи пассажирских лайнеров «Queen Elizabeth II» (1995 г. Северная Атлантика), «Bremen and the Caledonian Star» (2001 г. Южная Атлантика) с фриками.

Как видим, встреча с необычно высокими волнами происходит не только у побережья юго-восточной Африки, это широко распространенное явление. Можно отметить, что чаще фрики отмечаются в динамически активных районах океана, с хорошо выраженными и сильными течениями, вблизи берегов и мелей.

Долгое время основной причиной недоверия океанологов к рассказам выживших после встречи с волнами-убийцами моряками было связано с тем, что инструментальных подтверждений этим рассказам не было или было слишком мало. До сих пор судовые наблюдения за высотой волнения выполняются визуально, причем за высоту волнения принимается средняя высота из 5–6 наиболее крупных волн наблюдаемых в течение 5 мин., что ближе всего соответствует высоте волн 3% обеспеченности. Именно такого рода наблюдения были использованы в свое время для изучения законов распределения высот волн и построения численных моделей ветрового волнения.

Для описания распределения высот волн традиционно используется распределение Рэля. В нашем случае для удобства его можно записать в виде отношения высоты максимальной волны H_{max} из N волн к значительной высоте волн H_s [3,11]:

$$H_{max} / H_s = [\ln(N) / 2]^{1/2}. \quad (1)$$

Значительной высотой волн называют среднюю высоту трети наиболее высоких волн в записи (из N волн).

Приведенное соотношение последовательно уточнялось для различных условий волнообразования [3, 11].

Из соотношения (1) следует, что из 65 миллионов измеренных волн только одна будет больше значительной высоты волнения в три раза, что соответствует периоду повторения (при среднем периоде волн 5 с) примерно один раз в три месяца. Одна из $7,8963 \cdot 10^{13}$ волн будет больше значительной высоты волн в четыре раза, но

такое событие может случиться один раз несколько сотен тысяч лет. По существующим представлениям, в том числе используемым при проектных расчетах [3, 11], отношение высоты значительной волны к высоте волнения 0,1% уровня обеспеченности, которая принимается за максимальную высоту волны, для развитого волнения составляет 1:2, а на мелководье и при неразвитом волнении уменьшается до 1:1,8. Исходя из этого океанологи к фрикам стали относить волны, высота которых в два раза превышает значительную высоту волн.

На основе традиционных представлений о волновом режиме считается, что высоты максимальных волн (например, к югу от Африки) могут достигать 30 м, но такое событие возможно только один раз в 100 лет. Эти традиционные оценки противоречат данным последних инструментальных наблюдений [3, 5, 12].

Так, в работе [12] изложены результаты обработки данных инструментальных наблюдений за волнением. Наблюдения выполнялись ежечасно интервалами по 20 минут в период с 1998 по 2003 гг. с помощью радара Marex Radar Wave Monitor с частотой 2 Гц, установленного на стационарной платформе в точке с координатами 22,17° в. д. и 37,97° ю. ш. (к югу от Африки). Общая продолжительность наблюдений составила 50 359 часов. Наблюдения проводились автоматически, конструктивно радар был способен фиксировать высоты волн высотой до 43 м.

В качестве примера на рис. 4 приведен график хода значительных (нижняя кривая) и максимальных (верхняя кривая) высот волн 10–11 декабря 2002 г.

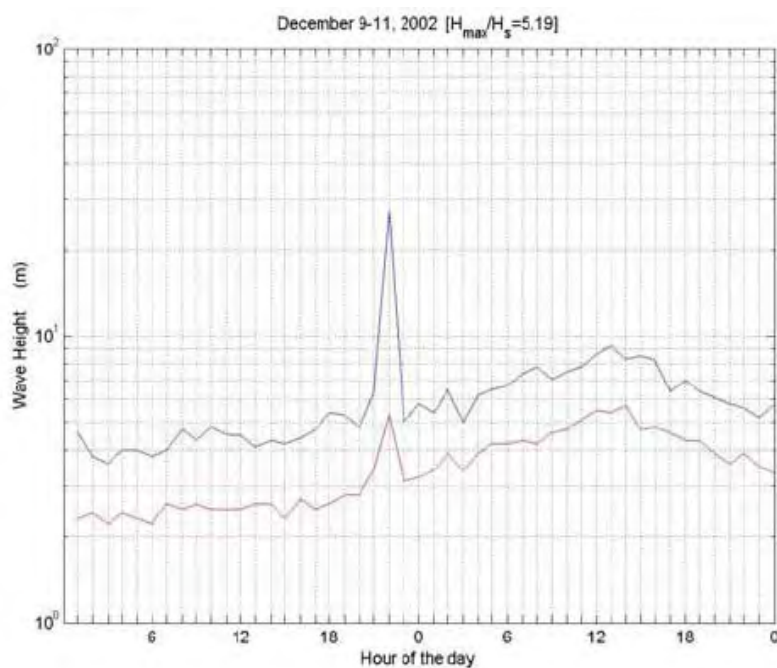


Рис. 4. График хода значительных (нижняя кривая) и максимальных (верхняя кривая) высот волн 10–11 декабря 2002 г. [4]

На рисунке видно, что в 22 часа 10 декабря 2002 г. на фоне волнения с высотой значительных волн высотой около 4 м наблюдалась волна высотой около 20 м.

На рис. 5 приведена полученная в результате исследований диаграмма связи значительных и максимальных высот волн.

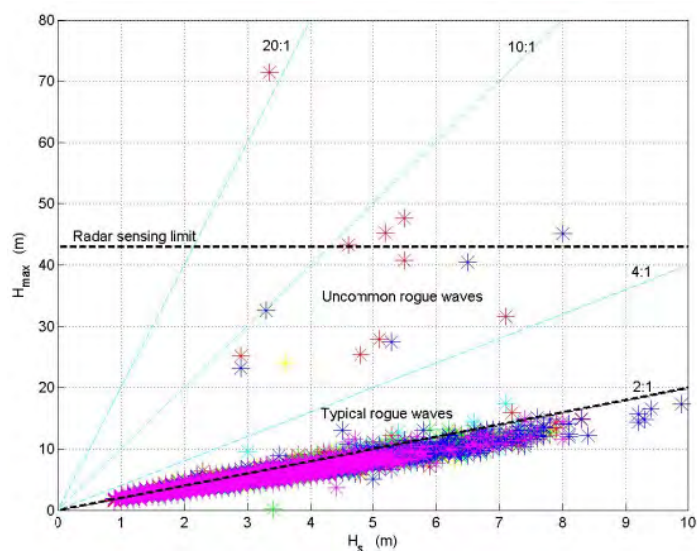


Рис. 3. Корреляция между значительной и максимальной высотами волн

Высоты волн свыше 43 м были отбракованы. Как видим, преобладающая часть наблюдений показала, что высота максимальных волн H_{max} не более чем в два раза выше значительной высоты волн H_s . В то же время выявлено 1563 фриков с отношением высот 1:2...1:10. При этом за шесть лет наблюдений выявлено пять волн высотой более 30 м и одиннадцать волн с высотой более 20 м. Это означает, что вероятность существования очень высоких волн высотой более 20 м, оцениваемая с использованием традиционных представлений, занижена по меньшей мере на два порядка. Авторы цитируемой работы по отношению высот максимальных волн к высотам значительных волн выделили две группы фриков – с отношением в диапазоне 2:1...4:1 – типичные фрики, 4:1...10:1 – нетипичные фрики.

Полученные результаты подтверждаются данными наблюдений на других платформах, а в июле 2004 г. появилась первая публикация о результатах изучения блуждающих волн с применением космических технологий [13, 14].

Работа была выполнена специалистами европейского космического агентства в рамках проекта MaxWave, начатого Европейским сообществом в декабре 2000 г. Для их анализа в немецком аэрокосмическом центре было использовано около 30 тысяч снимков небольших участков поверхности океана с разрешением в десяток метров, выполненных радиолокатором с синтезированной апертурой КА ERS за период продолжительностью три недели. За этот период на поверхности Мирового океана было выявлено более десяти одиночных гигантских волн высотой 25–30 м, что, по словам руководителя исследований В. Розенталя, превзошло все их ожидания [14].

В настоящее время предпринимаются значительные усилия для того чтобы объяснить природу фриков, построить модели, пригодные для их прогноза, и изменить технологии оценки высот волн редкой повторяемости для целей проектирования судов и гидротехнических сооружений.

Понимание механизмов образования аномально высоких волн и моделирование их динамики позволят ответить на вопросы, где и когда ожидать такую волну, как она выглядит и эволюционирует.

Традиционно используемые для описания ветровых волн линейные модели волнения лишь частично в особых условиях позволяют объяснить появление необычно высоких волн. По мнению отечественных специалистов Е. Н. Пелиновского и И. В. Лавренова [1, 8] в рамках линейной теории одним из механизмов рождения аномально высоких волн могут быть процессы взаимодействия волн с встречным неоднородным течением и их рефракция на шельфе. В этом случае создаются условия для искривления волнового фронта и по аналогии с акустикой или оптикой в этом случае на лучевых картинах распространения волн могут случайно возникать и исчезать области фокусировки волновой энергии (каустики).

Вместе с тем большинство ученых считают, что основным механизмом возникновения фриков являются процессы нелинейного взаимодействия волн [1, 3, 5]. Морским волнам свойственна нелинейная динамика, ярким примером которой служит их обрушение. Степень нелинейности однородных (монохроматических) волн определяется крутизной k . Нелинейность в первую очередь модифицирует все фокусирующие механизмы, поскольку скорость распространения волн становится функцией их амплитуды, а также способствует эффективному взаимодействию отдельных волн. Возникают принципиально новые – нелинейные – механизмы генерации очень высоких волн. Такого рода процессы описываются уравнением Шредингера – основным уравнением квантовой физики [1]. Современные результаты численного моделирования таких волн подтвердили возможность резонансного усиления волн в десять раз. Выявлено, что функция распределения волнения становится асимметричной (положительный третий момент), так что число больших гребней превышает число больших подошв («ям»), возникает зависимость четвертого момента (эксперса, влияющего на долю высоких волн) от степени нелинейности.

По мере уменьшения глубины области неустойчивых возмущений сужаются и физически отсутствуют в мелководном пределе. Однако и в этом случае волны не перестают быть нелинейными (и даже напротив, сила нелинейных эффектов по отношению к дисперсионным возрастает). Аномальные волны были зарегистрированы как на умеренных глубинах, так и в условиях мелководья. Здесь предложены сценарии возникновения аномальных волн в результате динамики нелинейных уединенных волн (солитонов), которые выглядят как долгоживущие гребни волн, а также их взаимодействия с потоками. То есть сейчас выявлены механизмы потенциально способные объяснить возникновение аномально высоких волн, практически в любых районах океана.

Несмотря на очевидный прогресс в изучении блуждающих волн, достигнутый в последние годы, до сих пор не ясно, какие именно механизмы их образования наиболее распространены в природе, а потому нет и реальных моделей прогнозирования этого явления.

С точки зрения климатического обеспечения проектирования судов и гидротехнических сооружений, совершенно очевидно, что традиционные методы расчета высоты ветрового волнения редкой повторяемости должны устарели и быть усовершенствованы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пелиновский Е. Н., Слюняев А. В. «Фрики» – морские волны убийцы // Природа. – 2007. – №3. http://vivovoco.ibmh.msk.su/vv/journal/nature/03_07/freakes.htm.
2. Электронный морской словарь-справочник. – <http://www.marinedictionary.ru/Index.html>.
3. Haver S. Design of offshore structures: impact of the possible existence of freak waves. – Proceedings ROGUE WAVES 2004, Brest, France, 20–22 October 2004. – P. 161–175. – <http://www.ifremer.fr/web-com/stw2004/rw/fullpapers/haver.pdf/>.
4. Бадулин С., Иванов А., Островский А. Влияние гигантских волн на безопасность морской добычи и транспортировки углеводородов. – Технологии ТЭК, 2005, февраль. – http://www.oilcapital.ru/edition/technik/archives/technik/technik_01_2005/68543.shtml
5. Kjeldsen S. P. Measurement of freak waves in Norway and related ship accidents. – Proceedings ROGUE WAVES 2004, Brest, France, 20–22 October 2004, p. 161–175, <http://www.ifremer.fr/web-com/stw2004/rw/fullpapers/kjeldsen.pdf>.
6. Kjeldsen S. P. Examples of Heavy Weather Damages caused by Giant Waves // SNAJ. Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan. – 1997. – Vol. 828. – 10. P. 744–748.
7. Mallory J. K. Abnormal waves on the south-east of South Africa // Inst. Hydrog. Rev., 1974. – 51, P. 89–129.
8. Лавренов И. В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб: Гидрометеоиздат, 1998. – 500 с.
9. Lawton G. Monsters of the Deep // New Scientist. – 2001. – V. 170. – №2297. – P. 28–32.
10. Hervé Socquet-Juglard. Spectral evolution and probability distributions of surface ocean gravity waves and extreme waves. Doctor Scientarum Thesis. Department of Mathematics, University of Bergen, November 2005, 65 p. – http://www.uib.no/info/dr_grad/2005/HerveSocquetJuglard.htm.
11. Лаппо Д. Д., Стрекалов С. С., Завьялов В. К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Теория. Инженерные методы. Расчеты.. Л.: Изд. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1990. – 432 с.
12. Paul C. Liu, Keith R. MacHuchon, Chin H. Wu. Exploring Rogue Waves from Observations in South Indian Ocean, Proceedings ROGUE WAVES 2004, Brest, France, 20-22 October 2004, 10 p. – <http://www.ifremer.fr/web-com/stw2004/rw/fullpapers/liu.pdf>
13. <http://www.sciencedaily.com/releases/2004/07/040721084137.htm>
14. http://www.esa.int/esaCP/SEMOKQL26WD_index_0.html

WAVE-KILLERS AS A REAL TREAT TO NAVIGATION SAFETY

S. I. Mastryukov
(«GNINGI» OJSC)

The information about the wave-killers in the ocean and their influence on the navigation safety is generalized. The problems of information support for designers of ships and hydrotechnical structures as well as for the mariners concerning the wave-killers are revealed. The trends of improving the climatic support concerning this phenomenon are formulated.

**ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ
ОБЩЕГО МОРЕПЛАВАНИЯ**

С. И. МАСТРЮКОВ
(ОАО «ГНИНГИ»)

Дано обоснование и определение понятия «климатическое обеспечение безопасности мореплавания», обобщен перечень гидрометеорологических объектов, элементов, процессов и явлений, влияющих на безопасность мореплавания, обоснованы предложения по структуре типового атласа гидрометеорологических условий мореплавания.

Интенсивное освоение континентального шельфа и склона Мирового океана, в том числе в суровых и малоизученных ранее районах океана, связанное с этим расширение зон и повышение интенсивности мореплавания привело к ужесточению требований и появлению новых подходов к учету гидрометеорологических условий плавания.

В настоящей статье сделана попытка исходя из новых требований к безопасности мореплавания и с учетом новых знаний о природе Мирового океана, обосновать состав и формы представления гидрометеорологической информации, включаемой в справочные пособия, используемые при проектировании судов и инфраструктуры морского транспорта, а также при подготовке к мореплаванию в интересах обеспечения его безопасности.

Ниже будем различать *оперативное гидрометеорологическое обеспечение безопасности мореплавания* сведениями о фактическом и прогнозируемом на ближайшие несколько суток состоянии погоды, гидрологических и ледовых условиях, а также *климатическое обеспечение* сведениями о гидрометеорологическом и ледовом режимах мореплавания.

Под *климатическим обеспечением безопасности общего мореплавания* будем понимать обеспечение сведениями о климатических показателях, опасных для мореплавания гидрометеорологических и ледовых условий юридических и физических лиц, занимающихся:

- проектированием и строительством морских судов;
- проектированием гидротехнических сооружений, портов, путей движения, систем управления движением и других объектов инфраструктуры морского транспорта;
- заблаговременным планированием морских операций (перевозка грузов, рыболовство, использование судов для разведки и разработки минеральных ресурсов океана и т. п.);
- заблаговременным планированием действий по защите жизни человека на море;
- заблаговременным планированием операций по ликвидации последствий загрязнения окружающей среды, вызванного авариями морских судов.

В современных условиях *изменения климата* становится очевидным как возрастание требований к достоверности климатической информации, так и необходимость учета климатических изменений при проектировании объектов инфраструктуры морского транспорта, нормативные сроки эксплуатации которых исчисляются десятилетиями.

Климатическое обеспечение безопасности общего мореплавания относится к группе информационных методов обеспечения безопасности мореплавания и предполагает определение состава опасных для мореплавания гидрометеорологических условий.

Исходя из требований и духа нормативных документов в области безопасности мореплавания под *гидрометеорологической и ледовой опасностью мореплавания* будем понимать гидрометеорологические элементы (объекты, процессы, явления), величина (наличие, интенсивность) или сочетание которых приводит или создает реальные предпосылки к:

- аварии судна, потери им мореходных качеств;
- гибели членов экипажа;
- загрязнению окружающей среды вследствие аварии судна;
- нарушению нормальных режимов эксплуатации и сверхнормативным нагрузкам на объекты инфраструктуры морского транспорта, в том числе систем навигационного оборудования.

К обоснованию состава и критериев опасных гидрометеорологических явлений можно подойти по-разному. Так, например, можно:

- ограничиться составом гидрометеорологической информации, содержащейся в традиционных пособиях для плавания (лоции, гидрометеорологические карты, атласы океанографических параметров и т. д.);
- обобщить механизмы влияния среды на мореплавание;
- обобщить современные отечественные и зарубежные требования к составу информации необходимой для проектирования судов и объектов морской инфраструктуры морского транспорта, путей движения и т. п.

Первый подход, основанный на использовании исторически сформировавшихся и не обновлявшихся последние 48 лет [1] требований к составу справочных гидрометеорологических пособий не является диалектическим. Анализ некоторых издаваемых УНиО МО РФ пособий по гидрометеорологическому режиму [2–4] выявил ряд недостатков, в частности:

- состав показателей гидрометеорологического и ледового режима не соответствует требованиям современных нормативных документов (в той или иной степени характерно для всех пособий);
- значимая часть информации не имеет отношения к безопасности мореплавания (характерно для атласов океанографических параметров и гидрометеорологических карт);
- использование заранее и не всегда правильно выбранных пространственных масштабов и периодов обобщения информации, жесткая регламентация форм представления информации, что без учета степени освещенности морских акваторий и без учета пространственной изменчивости гидрометеорологических полей приводит к появлению фиктивной пространственной структуры показателей режима

(характерно для гидрометеорологических карт, атласов океанографических параметров, атласов опасных явлений).

Несмотря на перечисленные недостатки, очевидно, что традиционный состав климатической информации должен рассматриваться как базовый, поскольку в известной степени в нем аккумулирован накопленный ранее опыт мореплавания. Пособия, издаваемые Росгидрометом, например, по проекту «Моря» [5, 6] не предназначены для обеспечения безопасности мореплавания.

Подход, основанный на обобщении механизмов влияния среды на мореплавание, представляется весьма перспективным и обоснованным. В отечественной литературе известны несколько работ в области гидрометеорологического обеспечения судовождения [7–9], в которых в той или иной степени обобщены сведения о влиянии гидрометеорологических условий на мореходные качества судов. К сожалению, во всех известных работах оценка влияния ограничивается оценкой влияния ветра, волнения, течений и льда на скорость судов и осадку судов. В лучшем состоянии находятся методы оценки влияния состояния среды на проектируемые объекты инфраструктуры морского транспорта [10]. Трудность реализации этого подхода вызвана комплексностью и часто опосредованностью и многофакторностью влияния среды на мореходные свойства судов и в целом на безопасность мореплавания.

Третий подход является формальным, так как, обобщив существующие нормативные требования к составу информации и критерии опасных явлений, не всегда можно убедиться в их обоснованности и признать их полными. Вместе с тем именно этот подход имеет юридическую силу.

При обосновании состава информации необходимо учитывать современную степень изученности океана. Например, до появления космических средств наблюдения за океаном океанологи не верили в существование в океане, волн-убийц (гигантские, аномальные волны, кэйпроллеры). Традиционные методы наблюдения за волнением в принципе не позволяли наблюдать эти одиночные волны в океане. До сих пор нет удовлетворительного климатического описания этих волн для мореплавателей. Нельзя исключить появления неких опасных природных факторов в будущем. В практике мореплавания возникают опасности, само существование которых трудно или даже невозможно предположить заранее. Например, считается, что буровое судно «Petromag Y» погибло при проведении подводных изыскательских работ вследствие того, что головка бура попала в полость, заполненную природным газом под высоким давлением, который стал вырываться в воду. Плотность морской среды резко снизилась, судно потеряло плавучесть и затонуло [11], такое объяснение, впрочем, нуждается в подтверждении.

Критерии опасных для мореплавания гидрометеорологических явлений помимо особенностей природного характера зависят от типа судна, рода морской операции, способов крепления перевозимых грузов, использования буксиров, наличия лоцмана на борту, особенностей навигационного оборудования, путей движения и ряда других факторов.

В нашей стране ограничения на районы, гидрометеорологические и ледовые условия плавания судов, накладываются Правилами Российского морского регистра судоходства [12]. Дополнительно существуют ограничения по гидрометеорологическим условиям отдельных транспортных операций (буксировка, транспортировка грузов и т. д.), по эксплуатации отдельных видов судовых систем, выполнению отдельных видов

действий при спасательных операциях, также определяемых правилами Морского Регистра РФ.

Проектирование гидротехнических сооружений, в том числе портов, причалов, судоходных трасс в соответствии с действующими строительными нормами и правилами [10] предполагает учет нагрузок на эти сооружения от ветра, волнения, снега, льда, течений, цунами, землетрясений, а также учет температурных воздействий. При этом согласно действующим нормам должна учитываться продолжительность нагрузок, их сочетание. Важно отметить, что в качестве нормативных значений при проектировании используются максимальные значения гидрометеорологических элементов, возможные один раз в несколько лет (от 1 до 100 лет) – в зависимости от класса строящегося объекта.

Критерии опасных гидрометеорологических условий для акваторий портов России, внешних рейдов портов, а также подходных судовых каналов устанавливаются Обязательными постановлениями Морской администрации портов в соответствии с «Кодексом торгового мореплавания Российской Федерации», «Общими правилам плавания и стоянки судов в морских портах России и на подходах к ним» [13].

В качестве примера в табл. 1 перечислены критерии опасных гидрометеорологических явлений, установленных в Обязательных постановлениях морской администрацией порта Архангельск [14].

Как видим, критические значения только скорости ветра для обеспечения тех или иных морских операций даже в одном порту лежат в пределах 8–20 м/с.

Указанные обстоятельства, многофакторность влияния гидрометеорологических условий на мореплавание обуславливают невозможность установления универсальных критериев опасных гидрометеорологических условий для мореплавания.

Таблица 1

Критерии опасных гидрометеорологических условий на акватории порта Архангельск [14]

	Скорость ветра	Высота волнения	Видимость	Дополнительно
Постановка на якорь	17 м/с			течения до 3 узлов
Съемка с якоря без буксира	10 м/с			течение до 2 узлов
Постановка на швартовые бочки	11 м/с	1,2 м		в светлое время
Перевозка пассажиров в порту	17 м/с	1		
Подъем пролетов мостов	14 м/с		1000 м	температура не ниже -30°C
Плавание по судоходному каналу	10 м/с, С3			
Плавание по отдельным участкам	14 м/с			
Плавание по всей акватории порта	20 м/с			
Плавание по всей акватории порта	11 м/с			для судов вместимостью от 3 тыс. т
Буксировка буксиром под мостом	8 м/с			не в период паводка
Производство водолазных работ	17 м/с	0,75 м		течение 1 узел, лед
Бункеровка судов	10 м/с	1,0 м		
Буксировка плотов с лесом	11 м/с		1000 м	без льда
Погрузо-разгрузочные работы	12 м/с		100 м	ливень, снегопад, обледенение

Отметим, что определение критериев опасности гидрометеорологических условий необходимо прежде всего для оперативного гидрометеорологического обеспечения. В целях выработки требований к климатическому обеспечению безопасности мореплавания достаточно ограничиться определением требований к составу гидрометеорологических элементов (объектов, процессов, явлений) и составу климатических показателей.

Ниже на основе анализа доступных нормативных документов в области безопасности мореплавания, представлений автора о механизмах влияния среды на суда и объекты инфраструктуры морского транспорта объекты приведены результаты обобщения сведений о составе опасных для мореплавания процессах и явлениях.

На безопасность мореплавания оказывают влияние:

1. *как опасные объекты навигационного характера, приводящие к столкновениям:*

– айсберги, ледяные поля, стамухи, гряды торосов;

2. *как опасные процессы способные привести к повреждению корпусов, систем и устройств судов:*

– сжатия льда;

– наличие ледяного покрова;

– штормовое волнение и ветер;

– тягун в порту;

3. *как опасные явления, способные привести к посадке на грунт, выбросу на берег, столкновениям, навалам, потере остойчивости:*

– ураганный ветер и волнение;

– цунами;

– волны-убийцы (кэйпроллеры);

– сильные течения;

– обледенение судов;

4. *как гидрометеорологические элементы и процессы, способные изменить скорость плавания и управляемость судов, снизив тем самым мореходные качества судов:*

– ветер, волнение, зыбь, течения, несовпадение направлений распространения волн зыби и ветрового волнения;

– дрейф льда;

– облипание корпуса снежно-ледяной подушкой;

5. *как гидрометеорологические элементы и процессы, способные изменить осадку судов:*

– волнение;

– изменение плотности воды;

6. *как гидрометеорологические элементы и процессы, способные изменить фактическую глубину:*

– колебания уровня (приливы/отливы, штормовые сгоны/нагоны, цунами, сезонные и многолетние изменения уровня);

– транспорт наносов под влиянием волнения и течений;

– движения земной коры, тектоническая и вулканическая деятельность;

7. как гидрометеорологические элементы, обуславливающие условия работы экипажа на палубе, условия безопасной погрузки и перевозки грузов, в том числе пожароопасных, условия приводящие к сверхнормативным режимам эксплуатации электрических устройств:

- ветер и волнение;
- обледенение;
- явления, ограничивающие метеорологическую дальность видимости (туманы, метели, выпадение снега, дождя, мороси, мгла, выпадение пыли, пепла и т. п.)
- температура и относительная влажность воздуха;
- грозы;

8. как гидрометеорологические элементы, затрудняющие обеспечение визуального наблюдения за навигационными опасностями:

- все явления, снижающие метеорологическую дальность видимости (МДВ);

9. как гидрометеорологические элементы, затрудняющие использование средств астронавигации

- облачность;

10. как гидрометеорологические элементы, маскирующие навигационные опасности на экранах РЛС, снижающие дальность обнаружения РЛС:

- осадки, заряды снега, туманы, грозы, облачность;
- волнение моря.

11. как гидрометеорологические элементы, нарушающие нормальные режимы стоянки судов в порту, способные привести к повреждениям судов:

- ледяной покров;
- ветер и волнение;
- тягун;
- примерзание к причалам;

В соответствии с изложенными представлениями автора, в табл. 2 приведен примерный состав гидрометеорологических объектов, элементов, процессов и явлений с указанием районов, где они могут быть опасны для мореплавания и информация о которых должна представляться при климатическом обеспечении безопасности мореплавания.

В состав климатических показателей гидрометеорологического режима традиционно входят включаемые в справочные пособия [2–4]:

- среднее арифметическое значение;
- экстремальные значения, реже среднеквадратическое отклонение;
- повторяемость явлений, градаций гидрометеорологических элементов.

Этих показателей режима сегодня недостаточно для заблаговременного планирования морских операций и особенно для климатического обеспечения проектирования судов и объектов инфраструктуры морского транспорта. В настоящее время заблаговременное планирование транспортировки крупных объектов, проектирование инфраструктуры морского транспорта предполагает оценку нагрузок и воздействий от гидрометеорологических элементов и процессов заданного уровня обеспеченности (периода повторения).

Традиционный состав показателей гидрометеорологического режима целесообразно дополнить более устойчивыми к засорению статистическими оценками:

- медианы;
- квантилей функции распределения, а главное:
- расчетными максимальными (минимальными) значениями гидрометеорологических элементов (прежде всего скорости ветра, высоты волнения) редкой повторяемости (с периодом повторения один раз в 1, 5, 10, 20, 50, 100 лет) либо с заданными уровнями обеспеченности (0,5, 1, 2, 5%-ной обеспеченности);
- значениями непрерывной продолжительности опасных гидрометеорологических условий заданных уровней обеспеченности;

Очевидно, что с расширением районов мореплавания возникает настоятельная потребность изучения опасных для мореплавания гидрометеорологических объектов и явлений в районах добычи углеводородов на шельфе арктических морей, особенно:

- основных характеристик ледяного покрова;
- айсбергов;
- течений.

Спутники, оснащенные радиолокаторами с синтезированной апертурой, могут быть реальным средством наблюдения за айсбергами и опасными ледовыми объектами в высоких широтах, а также средством исследования редких, но весьма опасных аномальных волн-убийц (кэйпроллеров) на акватории Мирового океана.

Таблица 2

Примерный перечень опасных для мореплавания гидрометеорологических элементов, процессов и явлений

Объект, элемент, явление, процесс	Характеристика	Открытые акватории морей, океанов	Прибрежные районы, мелководье, эстуарии, реки	Портовые акватории, узкости, каналы
Ветер	Скорость			
Волнение	Высота			
Зыбь	Высота			
Кэйпроллеры	Высота			
Прибой	Высота, глубина зоны обрушения			
Накат	Высота заплеска			
Бор	Высота, скорость			
Приливы	Величина			
Сгоны/нагоны	Величина			
Цунами	Отметки зон затопления			
Тягун	Интенсивность			
Плотность воды	Изменение при входе в реки, каналы			
Обледенение	Интенсивность			
МДВ	Величина			
Температура воздуха	Величина			
Относительная влажность	Величина			
Осадки	Интенсивность			
Туманы	Наличие, интенсивность			
Метели	Интенсивность			
Грозы	Наличие			

Объект, элемент, явление, процесс	Характеристика	Открытые акватории морей, океанов	Прибрежные районы, мелководье, эстуарии, реки	Портовые акватории, узкости, каналы
Дрейфующий лед	Кромка дрейфующего льда			
	Сплоченность			
	Толщина льда			
	Толщина снега на льду			
	Айсберги			
	Ледяные поля			
	Сжатия			
	Торосистость			
	Дрейф льда (направление, скорость)			
	Облипание судов			
Примерзание к причалу				
Неподвижный лед	Граница припая			
	Толщина припая			
	Стамухи			
	Навалы на объекты инфраструктуры			

Примечание: наиболее опасные элементы и явления выделены жирным курсивом, серым цветом отмечены районы, в которых могут встречаться рассматриваемые явления.

В условиях изменения климата, когда в ряде районов отмечается повышение повторяемости и интенсивности опасных гидрометеорологических явлений, справочные пособия, используемые при проектировании судов и объектов инфраструктуры морского транспорта, могут быть дополнены специальным разделом с изложением сведений о тенденциях изменения гидрометеорологического и особенно ледового режима.

Ниже приведены предложения по примерной структуре типового атласа гидрометеорологических условий мореплавания.

Атлас должен представлять собой набор карт по разделам: ветер, волнение, колебания уровня, течения, ограниченная видимость, распространение льдов, обледенение судов, температура и влажность воздуха, опасные гидрометеорологические явления, тенденции изменения климата.

По каждому разделу информация представляется для каждого месяца.

Раздел 1. Ветер. 4 набора карт с нагрузкой:

1. Изолинии повторяемости сильного ветра (15 и более м/с), гистограммы (розы) повторяемости ветра по 8 градациям направления и градациям скорости ветра через 5 м/с – по однородным районам. Для каждого месяца.

2. Изолинии скорости ветра с режимной обеспеченностью 1%, гистограммы средней непрерывной продолжительности скорости ветра выше 15, 20, 25, 30 м/с по однородным районам. Для каждого месяца.

3. Изолинии максимальной скорости ветра, возможной один раз в год, гистограммы непрерывной продолжительности скорости ветра выше 15, 20, 25, 30 м/с обеспеченностью 10% по однородным районам. Для каждого месяца.

4. Изолинии максимальной скорости ветра, возможной один раз в 50 лет, среднее направление ветра и устойчивость направления – по однородным районам в виде вектора. Для каждого месяца.

Раздел 2. Волнение. 4 набора карт с нагрузкой:

1. Изолинии повторяемости высоты ветрового волнения 3-х процентной более 5 м в морях, 8 м – в океанах, гистограммы повторяемости высот волн по градациям через 1 м – по однородным районам. Для каждого месяца.

2. Изолинии высоты волнения 3%-ой обеспеченности с режимной обеспеченностью 1%, гистограммы повторяемости средних периодов смешанного волнения с градацией 2 с. Для каждого месяца.

3. Изолинии максимальной высоты волнения 3%-ой обеспеченности, возможной один раз в год, розы повторяемости направления ветрового волнения. Для каждого месяца.

4. Изолинии максимальной высоты волнения 3%-ой обеспеченности, возможных один раз в 50 лет, розы повторяемости направления волн зыби. Для каждого месяца.

Раздел 3. Колебания уровня (для прибрежных и мелководных районов в одной системе высот). 7 наборов карт с нагрузкой:

1. Изолинии минимальной исторической величины уровня, графики сезонного хода среднего уровня по береговым пунктам. Одна карта – за многолетний ход.

2. Изолинии максимального исторического уровня, гистограммы повторяемости (обеспеченности) уровня по 8–10 градациям. Одна карта.

3. Изолинии максимальной величины прилива, штриховка по типам приливов. Одна карта.

4. Изолинии минимального уровня возможного один раз в год, гистограммы расчетных минимальных высот уровня обеспеченностью 0,01; 0,1; 1; 2; 5; 10%. Одна карта.

5. Изолинии максимального уровня возможного 1 раз в год, гистограммы расчетных максимальных высот уровня обеспеченностью 0,01; 0,1; 1; 2; 5; 10%. Одна карта.

6. Районирование по цунамиопасности, гистограммы высот волн цунами на отдельных участках побережья обеспеченностью 1; 2; 5; 10; 50%. Одна карта.

7. Районирование акваторий с выделением портов, где отмечается тягун, сезонный ход повторяемости тягуна – для портов.

Раздел 4. Течения. Два набора карт:

1. Схема общей циркуляции по сезонам, гистограммы повторяемости скорости поверхностных течений по данным инструментальных наблюдений, гистограммы (розы) повторяемости течений по направлениям. Две – четыре картосхемы.

2. Для приливных морей – расчетные схемы течений в навигационном слое по часам приливного цикла. 12 карт (для полусуточного прилива через один час, для суточного – через два часа).

Для бесприливных морей – типовые схемы течений для различных комбинаций скорости и направления ветра или типовых ветровых ситуаций.

Раздел 5. Метеорологическая дальность видимости

1. Изолиния повторяемости видимости 1000 м и меньше, гистограммы повторяемости видимости по градациям 0–100, 100–200, 200–500, 500–1000, 1000–2000 м, более 2000 м. Для каждого месяца.

Раздел 6. Распространение льдов.

1. Изолинии вероятности встречи льда. Для каждого месяца года.

2. Изолинии сплоченности льда толщиной 30/50/70 см (в зависимости от района) и больше для умеренной зимы. По месяцам года.

3. Среднее число айсбергов в трапеции 2x5 градусов, гистограммы распределения числа айсбергов по размерам. По месяцам сезона айсбергов.

4. Граница айсберговых вод, места редкого наблюдения айсбергов. Одна карта.

5. Схема зон сжатия и разряжения льдов по направлениям и скорости ветра. По числу направлений ветра (не более восьми) и числу градаций скорости (например, 7–12, 13–17, 18–22 м/с).

6. Схема границ припая в период максимального развития, графики сезонного хода средней толщины припая. Положение зон заприпайных полыней, графики вероятности существования полыней по месяцам года. Одна карта.

7. Сроки наступления основных фаз ледовых явлений (первого появления льда, становления припая, разрушения припая, исчезновения льда) в умеренную, мягкую, суровую зимы. 12 схем.

Раздел 7. Обледенение судов.

1. Изолинии повторяемости обледенения по типам. По месяцам холодного сезона.

Раздел 8. Температура и влажность воздуха.

1. Изолинии средней температуры и относительной влажности воздуха, графики распределения температуры заданных уровней обеспеченности (1, 2, 5, 10, 20, 50, 70, 90, 95, 98, 99%) – по однородным районам. По месяцам года.

Раздел 9. Опасные гидрометеорологические явления.

1. Типовые траектории тропических циклонов (заданной интенсивности), среднее число тропических циклонов за месяц по типовым траекториям или трапециям открытого моря. По месяцам сезона тайфунов.

2. Расположение мест катастроф и аварий, вызванных кэйпроллерами, диапазон высот волн – по однородным районам. Одна карта.

3. Изолинии повторяемости туманов, гистограммы повторяемости непрерывной продолжительности туманов по градациям 6 часов. По месяцам года.

4. Изолинии среднего годового количества осадков, гистограммы сезонного хода среднего количества осадков. Одна карта.

Раздел 10. Тенденции изменения климата.

1. Графики многолетнего хода среднегодовой температуры воздуха – по данным береговых станций, один график многолетнего изменения уровня Мирового океана. Одна карта.

2. Изолинии изменения толщины льда в период его максимального развития за 10–20 лет, графики многолетнего изменения ледовитости морей (акваторий). Одна схема.

3. Изолинии изменения продолжительности ледового периода за 10–20 лет, график многолетнего хода продолжительности навигационного (безледного) периода. Одна карта.

4. Среднее положение кромки льда в период минимального и максимального развития ледяного покрова через 10, 20, 50, 100 лет.

Для создания пособий с предлагаемым набором показателей, наряду с традиционно используемыми сведениями судовых гидрометеорологических наблюдений, потребуется шире использовать данные береговых гидрометеорологических наблюдений, результаты численного моделирования

волнения, течений, приливов, современные методы статистической обработки результатов наблюдений. Предпосылки для создания такого рода пособий в НИЦ ГНИНГИ МО РФ имеются, однако без интеграции усилий с ведущими мореведческими организациями страны полноценно решить задачу создания современных пособий по безопасности мореплавания вряд ли удастся.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила Гидрографической службы №36. Составление и издание руководств и пособий для плавания. – Л.: Изд.ГУНиО МО, 1961. – 205 с.
2. Лоция Карского моря. Ч. I. Карское море, за исключением Обь-Енисейского района. – СПб: Изд.ГУНиО МО, 1998. – 332 с.
3. Гидрометеорологические карты Баренцева моря. – СПб: Изд. ГУНиО МО, 2005. – 12 л.
4. Атлас гидрометеорологических параметров. Баренцево море. –СПб: Изд. ГУНиО МО, 2005, адм. № 6119. – 256 с.
5. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР, том 6, Баренцево море, вып.1 и 2. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 264 с.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.1, Баренцево море, вып.1. – Л.: Гидрометеиздат, 1990, – 280 с.
7. Гордиенко А. И., Дремлюг В.В. Гидрометеорологическое обеспечение судоходства. – М.:Транспорт, -1989, –240 с.
8. Шалаев В. М. Гидрометеорологические условия и мореплавание. – М.: «Транспорт». -1975, –248 с.
9. Дремлюг В. В., Шифрин Л. С. Навигационная гидрометеорология. – М.: Транспорт, 1978. – 246 с.
10. Строительные нормы и правила. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. – М.: Стройиздат, 1986. – 34 с. – СНИП 2.06.01.86, – <http://www.vashdom.ru/snip/20601-86/>.
11. Вейхман В.. Записки по безопасности мореплавания. – <http://www.sea-safety.ru/>.
12. Правила квалификационных освидетельствований судов. В надзаг. Российский морской регистр судоходства. – СПб: 1998, – 142 с.
13. Общие правила плавания и стоянки судов в морских портах РФ и на подходах к ним. Введены Департаментом морского транспорта Минтранса РФ и Комитетом РФ по рыболовству 1.07.1993, 26с., <http://pilotservice.narod.ru/docs/genrules.htm>.
14. http://www.russianports.ru/arha/obyzat1.htm#_Toc20198760.

CLIMATIC SUPPORT FOR THE SAFETY OF GENERAL NAVIGATION

S. I. Mastryukov
(«GNINGI» OJSC)

The substantiation and definition of the notion of “climatic support for the navigation safety” are presented. The list of hydrometeorological objects, elements, processes and phenomena influencing the navigation safety is generalized. The proposals for the structure of the standard atlas of the hydrometeorological sailing conditions are substantiated.

**О ВОЗМОЖНОСТИ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ
ИНДИВИДУАЛЬНОГО СОБЫТИЯ И ЕГО ПОВТОРЯЕМОСТИ В ПРАКТИКЕ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ**

Ю. Н. ЖУКОВ
(ОАО «ГНИНГИ»)

Рассматриваются соотношения между вероятностью индивидуального события и его частотой появления в серии наблюдений. Предполагается независимость и устойчивость частоты реализаций события в серии.

В гидрометеорологии широко применяются статистические методы обработки наблюдений и представления результатов анализа. Это проявляется, в частности, в использовании вероятностных прогнозов [1] в практике как гражданского, так и военного гидрометеорологического обеспечения (ГМО). Учитывая особую значимость обеспечения ВМФ достоверной информацией, предполагается, что не должно быть сомнений в корректности применения статистики в практике ГМО. Для этого как минимум необходимо отсутствие методологических ошибок при применении статистических методов. Фактическое состояние дел свидетельствует, что некорректность возникает при неадекватном использовании базовых понятий и методов классической математической статистики.

Рассмотрим часто встречающуюся ситуацию, при которой по имеющимся данным о частоте (повторяемости) наступления гидрометеорологических событий (величин) делаются выводы о вероятности наступления индивидуального события (величины). Это происходит, например, когда очередной прогноз сопровождается вероятностью его осуществления, в качестве которой берут оправдываемость сделанных ранее аналогичных прогнозов погоды. Другим примером служит ситуация при принятии решения на конкретную задачу ВМФ, когда необходима информация об осуществлении конкретного набора гидрометеорологических условий на момент решения задачи в районе ее проведения. В качестве такой информации предоставляется частотность появления этих условий, интерпретируемая как вероятность их осуществления во время решения задачи в районе ее проведения.

Для определенности положим, что требуемая совокупность гидрометеорологических условий является случайной величиной X , удовлетворяющей всем необходимым аксиомам теории вероятностей. В частности будем считать, что наблюдения за X представляют независимую выборку, частоты сходятся и, вообще говоря, для X выполняется закон больших чисел [1]. Для статистических оценок диапазон изменений X разбит на L ($L = [2, \infty)$) взаимно непересекающихся интервалов x_i ($i = [1, L]$) в совокупности покрывающих весь диапазон изменений. Пусть число наблюдавшихся x_i в серии из N наблюдений будет k_i . Тогда относительная частота появления x_i интервала в этой серии наблюдений будет $\bar{p}_N(x_i)$. Вероятность осуществления конкретного единичного (уникального) гидрометеорологического явления обозначим $P(x_i)$.

В рассмотренных выше и аналогичных им ситуациях вероятность $P(x_i)$ осуществления конкретного единичного (уникального) гидрометеорологического явления отождествляется со статистической повторяемостью (вероятностью) появления этого явления в некоторой серии наблюдений $\tilde{p}_N(x_i)$. Что можно сказать о корректности такого отождествления? Ответ на этот вопрос можно дать с логической и «технической» точек зрения.

С логической точки зрения такое отождествление является логической ошибкой, связанной с подменой понятий, а именно, употребления базовых понятий теории вероятности. Несмотря на то, что множество значений x_i формально одно и то же для $\tilde{p}_N(x_i)$ и $P(x_i)$, эти величины принадлежат к разным пространствам элементарных событий. Величина $\tilde{p}_N(x_i)$ задана на множестве различных моментов времени, а $P(x_i)$ – в фиксированный конкретный момент. Таким образом, условия, на которых эти величины рассматриваются, различны, а это противоречит одному из основных методологических требований математической статистики – сопоставляемые вероятности должны быть заданы на одной и той же статистически однородной совокупности [2].

Кроме того, статистический закон по своей понятийной основе устанавливает только вероятностное распределение для значений величин в индивидуальных случаях. В этом смысле статистический закон $\tilde{p}_N(x_i)$ не предсказывает, что произойдет в любом конкретном случае. Логически непротиворечивая интерпретация вероятности рассматривает каждое числовое вероятностное суждение как высказывание об относительной частоте, с которой встречается событие определенного рода и только в рамках последовательности явлений [3]. В соответствии с этой интерпретацией высказывание, что «Завтра будет дождь с вероятностью p_* », в котором p_* является статистической оценкой, не является высказыванием о конкретном завтрашнем дожде. В действительности это высказывание говорит лишь о том, что относительная частота дождя равна p_* . Указанные виды высказываний с логической точки зрения не являются суждениями, и им нельзя приписать значение истинности, так как они не включаются в класс суждений логически допустимых из исходного набора статистических понятий.

В связи с этим можно сказать, что с логической точки зрения $\tilde{p}_N(x_i)$ и $P(x_i)$ относятся к разным типам вероятности. С учетом сделанных предположений о применимости закона больших чисел для X величина $\tilde{p}_N(x_i)$ относится к типу апостериорных вероятностей, тогда как $P(x_i)$ – к типу субъективных вероятностей [4]. На практике, когда за оценку $P(x_i)$ принимают значение $\tilde{p}_N(x_i)$, неявно производят смешение типов понятий. Таким образом, такое отождествление $\tilde{p}_N(x_i)$ и $P(x_i)$ является логической ошибкой и в ответственных случаях, например, в гидрометеорологическом обеспечении ВМФ, недопустимо. Однако действительность показывает, что нельзя упрекнуть гидрометеорологию в следовании законам логики и аргументации. Поэтому оценим корректность отождествления $\tilde{p}_N(x_i)$ и $P(x_i)$ с

«технической» точки зрения, т. е. опишем количественные соотношения между ними в предположении «правомерности» их отождествления.

Для этого нужно найти явную зависимость между $\tilde{p}_N(x_i)$ и $P(x_i)$. Для простоты рассуждений в качестве подходящей математической модели воспользуемся схемой испытания Бернулли. Это допустимо при конечной дискретности разбиения значений X и в предположении о применимости закона больших чисел. Будем интерпретировать $P(x_i)$ как вероятность осуществления x_i в единичном случае и обозначим ее через p . Вероятность осуществления всех остальных значений $\{x_j\}_1^L, j \neq i$ будет равна $q = 1 - p$. Тогда вероятность $\tilde{p}_N(x_i)$ того, что в N наблюдениях с вероятностью осуществления x_i в каждом единичном наблюдении p наблюдалось k раз, значение x_i будет равно [5]

$$\tilde{p}_N(x_i) \stackrel{def}{=} b(k; N, p) = \binom{N}{k} p^k q^{N-k}, \quad (1)$$

где $\binom{N}{k} = \frac{N!}{k!(N-k)!}$ – биномиальный коэффициент.

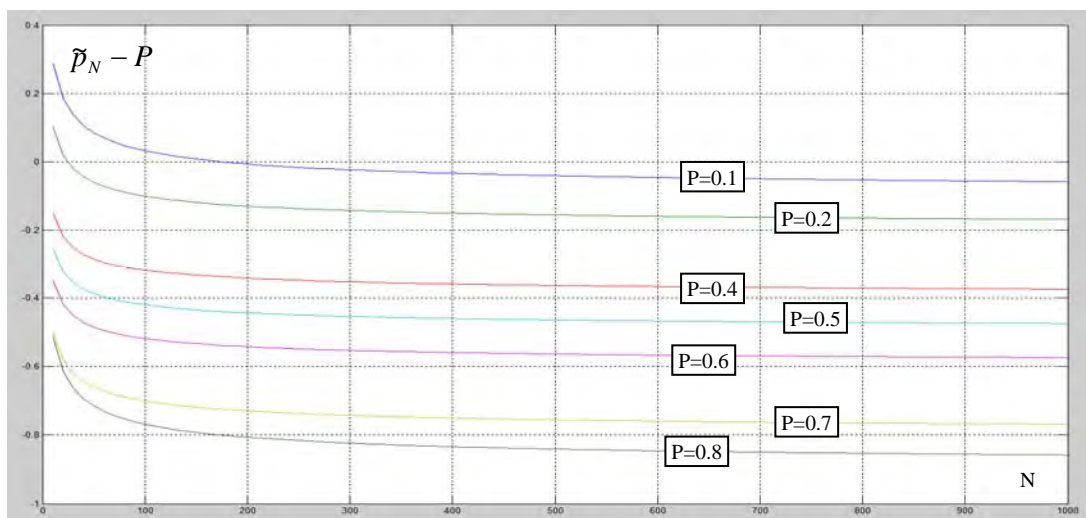
Какие выводы можно сделать из (1) относительно соотношения между $\tilde{p}_N(x_i)$ и $P(x_i)$?

Выражение (1) получено в предположении отождествления, т. е. равенства $\tilde{p}_N(x_i)$ и $P(x_i)$. Однако из выражения (1) следует, что величина $P(x_i)$ практически всегда не равна $\tilde{p}_N(x_i)$. На рисунке, где представлены графики разности между ними, можно видеть, что в подавляющем большинстве случаев $\tilde{p}_N(x_i)$ будет меньше $P(x_i)$. Только при малых значениях $P(x_i)$ (около 0,1) и малых значениях N (меньше 200) величина $\tilde{p}_N(x_i)$ соответствует $P(x_i)$.

Главный вывод: полученный результат свидетельствует, что с «технической» точки зрения $\tilde{p}_N(x_i)$ и $P(x_i)$ нельзя отождествлять. Это полностью согласуется с логическим анализом вопроса, изложенным выше.

Приведем еще один аргумент в пользу этого вывода. Безусловно, при справедливости закона больших чисел величина $\tilde{p}_N(x_i) = k_i/N$ является математическим ожиданием осуществления k_i раз условий x_i в серии из N наблюдений. Однако в различных сериях наблюдений конкретное значение k_i испытывает очень большие отклонения от среднего. Величина k'_i для отдельной серии никак не связана с k_i для всей совокупности различных наблюдений, т. е. с ее теоретическим значением [5]. Это связано с тем, что закон больших чисел гарантирует только то, что отношение числа благоприятных случаев к общему числу наблюдений стремится к $\tilde{p}_N(x_i)$, т. е. разность логарифмов чисел k_i и N стремится к нулю (при увеличении числа бросаний). Однако величину разности между

собственно числами k_i и N этот закон никак не «оговаривает» и не ограничивает. Разность между ними описывается теорией случайных блужданий [5].



Графики разности между величиной $\check{P}_N(x_i)$ и $P(x_i)$

Более подробные сведения о парадоксах и противоречиях, встречающихся при практическом использовании вероятностно-статистических методов, можно найти в работах [4, 5, 6].

Таким образом, выполненный анализ одной из задач обеспечения статистическими оценками свидетельствует о необходимости тщательной проверки корректности применения статистических методов. Игнорирование этого обстоятельства может привести к огромным потерям в практике и потере престижа системы гидрометеорологического обеспечения ВМФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пановский Г. А., Брайер Г. В. Статистические методы в метеорологии. – Л.: ГИМИЗ, 1967. – 241 с.
2. Тутубалин В. Н. Теория вероятностей. Краткий курс и научно-методические замечания. – М.: Издательство Московского университета, 1972. – 229 с.
3. Поппер К. Логика научного исследования. М.: Республика, 2004. – 447 с.
4. Чайковский Ю. В. О природе случайности. – М.: Центр системных исследований – Институт истории естествознания и техники РАН, 2004 г. – 280 с.
5. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. – Т. 1. – М.: Мир, 1984 г. – 527 с.
6. Секей Г. Парадоксы в теории вероятностей и математической статистике. – М.: Мир, 1990 г. – 240 с.
7. Мизес Р. Вероятность и статистика. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009 г. – 264 с.

ON THE POSSIBILITY TO IDENTIFY THE PROBABILITY OF AN INDIVIDUAL EVENT AND ITS REPEATABILITY IN THE PRACTICE OF HYDROMETEOROLOGY

Yu. N. Zhukov
(«GNINGI» OJSC)

The relationships between the probability of an individual event and its frequency of occurrence in a series of observations and considered. The independence and stability of realization frequency for events in a series are supposed.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

АЛЕКСЕЕВ Сергей Петрович, генеральный директор ОАО «ГНИНГИ», заслуженный военный специалист РФ, председатель СПб регионального отделения Российского общественного института навигации, академик Академии транспорта РФ, контр-адмирал, докт. техн. н., профессор Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – штурман. Автор более 200 печатных трудов.

БЕЛОУСОВА Эльвира Алинияз кызы Начальник отдела ЗАО «Система». Окончила Азербайджанский политехнический институт по специальности Вычислительная техника. Научные интересы – ГИС. Автор 5 печатных работ.

БОГДАНОВИЧ Михаил Леонидович, начальник отдела ОАО «ГНИНГИ», капитан 1 ранга запаса, канд. техн. н., доцент. Окончил Высшее военно-морское училище подводного плавания, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация: навигационно-гидроакустические системы и измерители скорости. Автор более 50 печатных трудов.

БОЛДЫРЕВ Владимир Сергеевич, ведущий научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института морского флота, капитан 1 ранга в отставке, докт. техн. н., доцент. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе, Военно-Морскую академию им. А. Н. Крылова. Специализация – навигационно-гидрографическое обеспечение морской деятельности государства. Автор более 200 научных трудов.

ВАСИЛЬЕВ Владимир Янович, заместитель по научной работе директора Центрального научно-исследовательского института морского флота, канд. техн. н., доцент. Окончил Ленинградское высшее инженерное мореходное училище. Специализация – судовождение. Автор более 150 научных трудов.

ВОЛЬФСОН Геннадий Борисович, ведущий научный сотрудник ЦНИИ «Электроприбор», докт. техн. н. Окончил Ленинградский электротехнический институт. Область научных интересов – гравиметрия. Автор 115 печатных трудов.

Sergey P. ALEKSEYEV, director-general of «GNINGI» OJSC, Rear-Admiral, DSc, Honoured Military Specialist, chairman of St. Petersburg regional branch of the Russian Public Institute of Navigation, member of the Academy of Transport, RF. Graduated from Frunze Naval College and Naval Academy. Speciality: navigation. Author of more than 200 publications.

Elvira A. BELOUSOVA, chief of section, “Systema” closed-type JSC, graduated from Azerbaijan Polytechnical Institute, majoring in computer science. Sphere of scientific interests: GIS. Author of five publications.

Mikhail L. BOGDANOVITCH, chief of division, «GNINGI» OJSC, Captain 1-st rank (Ret), CandS, reader. Graduated from the Naval College of Submerged Sailing, Kuznetsov Naval Academy. Speciality: navigation-hydroacoustic systems and speed sensors. Author of more than 50 publications.

Vladimir S. BOLDYREV, leading researcher The Central Research Institute of the Marine, Captain 1-st rank (Ret), DSc, reader. Graduated from Frunze Naval College, Krylov Naval Academy. Speciality: navigation-hydrographic support for maritime activities of the State. Author of more than 200 scientific works.

Vladimir Y. VASILYEV, Deputy Director (Scientific work), The Central Research Institute of the Marine, CandSc, reader. Graduated from Leningrad Higher Engineering Marine College. Speciality: marine navigation. Author of more than 150 scientific works.

Gennady B. WOLFSON, leading researcher, The Central Research Institute «Electropribor», DSc. Graduated from Leningrad Electrotechnical Institute. Sphere of scientific interests: gravimetry. Author of 115 publications.

ГАСНИКОВ Олег Александрович, начальник отдела ОАО «ГНИНГИ». Окончил Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Специализация: гидрометеорология, вычислительная техника. Автор более 20 научных публикаций.

ГЛАДСКИХ Евгений Петрович, начальник лаборатории ОАО «ГНИНГИ», капитан 2 ранга в отставке. Окончил Высшее военно-морское училище им. М.В. Фрунзе. Специализация – гидрография. Автор более 10 печатных трудов, ряда патентов.

ГЛУХОВ Юрий Андреевич, заместитель начальника отдела ОАО «ГНИНГИ», капитан 2 ранга запаса. Окончил Высшее военно-морское училище подводного плавания им. Ленинского комсомола. Специализация – штурман. Автор около 30 печатных трудов.

ГРУЗДЕВ Николай Михайлович, профессор Морского корпуса Петра Великого – Санкт-Петербургского военно-морского института, докт. в. н., профессор, заслуженный деятель науки РФ. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе, Военно-морскую академию кораблестроения и кораблевождения им. А. Н. Крылова. Область научных интересов – методы морской навигации, математическая обработка математической информации, навигационная безопасность плавания, теория навигационных погрешностей. Автор 385 печатных трудов, из которых – 39 монографий.

ГОЛЯКОВ Алексей Дмитриевич, главный специалист ОАО «Научно-исследовательский институт точной механики», профессор, д.т.н. Специализация – навигация и безопасность. Автор более 120 печатных работ. Окончил Военно-космическую академию имени А.Ф. Можайского.

ЖУКОВ Юрий Николаевич, ведущий научный сотрудник ОАО «ГНИНГИ», докт. техн. н. Окончил Ленинградский гидрометеорологический институт. Специализация – гидрометеорология. Автор более 40 печатных трудов.

Oleg A. GASNIKOV, chief of division, «GNINGI» OJSC. Graduated from Leningrad Higher Engineering Marine College and St. Petersburg State Polytechnical University. Speciality: hydrometeorology, computer science. Author of more than 20 publications.

Evgeny P. GLADSKIKH, chief of laboratory, «GNINGI» OJSC, Captain 2nd Rank (Ret). Specialty: hydrography. Author of more than 10 publications and number of patents.

Yury A. GLUKHOV, deputy chief of division, «GNINGI» OJSC, Captain 2nd Rank (Ret). Specialty: navigator. Author of about 30 publications.

Nicolai M. GRUZDEV, professor of the Peter the Great Marine Corps – St. Petersburg Naval Institute, DSc, professor, RF Honoured Scientist. Graduated from Frunze Naval College, Krylov Naval Academy. Sphere of scientific interests: methods of marine navigation, mathematic processing of mathematic information, navigation safety, theory of navigation errors. Author of 385 published scientific works, including 39 monographs.

Aleksey D. GOLYAKOV, main Expert of the «Research Institute of Fine Mechanics» JSC, professor, DSc. Specialty: navigation and safety. Author of more than 120 publications.

Yuri N. ZHUKOV, leading researcher, «GNINGI» OJSC, DSc. Graduated from Leningrad Hydrometeorological Institute. Speciality: hydrometeorology. Author of more than 40 publications.

ЗУБЧЕНКО Эдуард Семенович, преподаватель Военно-морской академии, капитан 1 ранга в отставке, докт. техн. н., старший научный сотрудник. Окончил высшее военно-морское училище им М. В. Фрунзе, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – гидрография, аэрокосмические методы сбора гидрографической информации. Автор 45 печатных трудов.

КОСТИН Виктор Никораевич, начальник лаборатории ОАО «ГНИНГИ», канд. техн. н., доцент. Окончил Ленинградский государственный университет. Область научных интересов – навигация. Автор более 80 печатных трудов.

КУРСИН Сергей Борисович, заместитель генерального директора ОАО «ГНИНГИ», канд. техн. н., капитан 1 ранга запаса. Окончил Каспийское высшее военно-морское училище им. С. М. Кирова, Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Область научных интересов – навигация. Автор 25 печатных трудов.

КОРОВЯКОВСКИЙ Юрий Павлович, начальник управления ЗАО «Система». Закончил Ленинградский государственный университет. Кандидат физ-мат. наук. Научные интересы – ГИС. Имеет 30 печатных работ.

ЛАВРЕНТЬЕВ Анатолий Васильевич, главный научный сотрудник ОАО «ГНИНГИ», профессор Морского корпуса Петра Великого (Санкт-Петербургского военно-морского института), капитан 1 ранга в отставке, докт. воен. н., действительный член Академии военных наук и Международной академии информатизации, Почетный академик РАЕН, Почетный профессор СПбВМИ, Почетный член Ученого совета СПбВМИ, Почетный начальник кафедры СПбВМИ. Окончил Тихоокеанское военно-морское училище. Область научных интересов – военное кораблевождение и методология подготовки специалистов ВМФ. Автор более 350 печатных работ.

МАКСИМОВ Владимир Анатольевич, старший научный сотрудник ОАО «ГНИНГИ». Окончил Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова. Специализация – инженер-судоводитель. Автор 3 печатных работ, ряда патентов.

Edward S. ZUBCHENKO, teacher, the Naval Academy, DSc, senior researcher, Captain 1-st rank (Ret.). Graduated from Frunze Naval College, the Naval Academy. Speciality: hydrography, aerospace methods of collecting the hydrographic information. Author of 45 publications.

Victor N. KOSTIN, chief of laboratory, «GNINGI» OJSC, Cand Sc, reader. Graduated from Leningrad State University. Author of more than 80 publications.

KURSIN Sergei B, deputy director-general «GNINGI» OJSC, CandSc, capitan 1-st rank (Ret.). Graduated from Kirov Caspian Naval College (1992), Kuznetsov Naval Academy. Sphere of scientific interests navigation. Author of 25 publications.

Yury P. KOROVYAKOVSKY, chief of department, «Systema» closed-type JSC. Graduated from Leningrad State University, majoring in astrophysics, Candsc. Author of 30 publications.

Anatoly V. LAVRENTYEV, chief researcher, «GNINGI» OJSC; professor, St. Petersburg Naval Institute, Captain 1-st rank (Ret.), DSc, member of the Academy of Military Sciences and International Academy of Informatization; Honorary Academician of the Russian Academy of Natural Sciences; Honorary professor of Naval Institute and Honorary member of the Scientific Council of the Naval Institute; Honorary chief of department. Graduated from the Pacific Naval College. Sphere of scientific interests: military navigation and methodology of training the specialists for the Navy. Author of more than 350 publications.

Vladimir A. Maximov, senior researcher, «GNINGI» OJSC. Specialty: engineer-navigator. Author of three publications and a number of patents.

МАСТРЮКОВ Сергей Иванович, начальник отдела ОАО «ГНИНГИ», полковник в запасе, канд. техн. н. Окончил Ленинградский гидрометеорологический институт. Специализация – океанология. Автор около 100 печатных трудов.

МАЛЕЕВ Павел Иванович, ведущий научный сотрудник ОАО «ГНИНГИ», капитан 1 ранга в отставке, докт. техн. н. Окончил Казахский государственный университет, Специальные курсы при Военно-морской академии им. А. Н. Крылова. Специализация – технические средства навигации. Автор около 250 печатных трудов.

СТАРКОВ Сергей Яковлевич, начальник лаборатории надежности ОАО «Научно-исследовательский институт точной механики». Специализация – надежность и безопасность. Автор более 10 печатных работ. Окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения.

УДАЛОВ Виктор Васильевич. Начальник лаборатории ОАО «ГНИНГИ». Окончил Ленинградский государственный университет. Специализация – гидрофизика. Автор 19 публикаций.

ФИЛИН Валентин Алексеевич, ст. н. сотр. НИЦ РЭВ ВМФ – филиал ФГУП «24 НИИ МО РФ», докт. техн. н. Окончил Ленинградский государственный университет. Специализация – гидроакустика. Автор более 70 научных работ.

ЯКОВЛЕВ Александр Николаевич, старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института морского флота, контр-адмирал в отставке, канд. техн. н., доцент, профессор Академии военных наук РФ. Окончил Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. С. О. Макарова, Военно-морскую академию им. А. Н. Крылова. Специализация – навигационно-гидрографическое обеспечение морской деятельности государства, изучение Мирового океана, системотехника. Автор более 80 научных трудов.

Sergei I. MASTRYUKOV, chief of division, «GNINGI» OJSC, Colonel (Ret.), CandSc. Graduated from St. Petersburg Hydrometeorological Institute. Speciality: oceanology. Author of about 100 publications.

Pavel I. MALEYEV, leading researcher, «GNINGI» OJSC. Captain 1st rank (Ret.), DSc. Graduated from Kazakh State University, Specialized Course at Krylov Naval Academy. Speciality: technical means of navigation. Author of about 250 publications.

Sergey Ya. STARKOV, chief of reliability laboratory of the «Research Institute of Fine Mechanics» JSC. Specialty: reliability and safety. Author of more than 10 publications.

Victor V. UDALOV, chief of laboratory, «GNINGI» OJSC. Graduated from Leningrad State University. Speciality: hydrophysics. Author of 19 publications.

Valentin A. FILIN, senior researcher, the Navy Research Centre of Radioelectronic Armament – the Branch of Federal State Enterprise «24 Research Institute, RF MoD». Graduated from Leningrad State University. Speciality: hydroacoustics. Author of more than 70 scientific publications

Alexander N. YAKOVLEV, senior researcher, The Central Research Institute of the Marine, Rear Admiral (Ret), CandSc, reader, professor of the Academy of Military Sciences. Graduated from Makarov Pacific Naval College, Krylov Naval Academy. Speciality: navigation-hydrographic support for maritime activities of the State, studies of the World ocean, system technology. Author of more than 80 scientific works.

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

Информация о правилах оформления подписки на издания Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института

Юридические и физические лица могут приобрести следующие издания ОАО «ГНИНГИ»: журнал «Навигация и гидрография», материалы Российской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии».

Приобрести издания можно, оформив заказ на журнал и/или сборники докладов конференций как за наличный, так и безналичный расчет.

Время оформления подписки или заказа не ограничено.

Цена одного номера (выпуска):

- журнала «Навигация и гидрография» – 190 руб.;
- сборника «Труды конференции "НО-2007"» – 1000 руб.;
- сборника «Труды конференции "НО-2007"» на CD – 500 руб.;

Заполненный бланк-заказ просим высылать:

199106, Россия, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 41

Начальнику отдела НТИ ОАО «ГНИНГИ» Бахмутову В.Ю.

Копию платежного поручения можно переслать по тел/факсу +7 (812) 327-99-80 или на E-mail mail@gning.ru

Глубокоуважаемые коллеги!

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

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

Журнал распространяется по подписке. Кроме того, он рассылается в органы военного управления различного уровня, научно-технические библиотеки высших военно-морских учебных заведений, научно-исследовательских организаций, крупнейшие библиотеки России.

Информация для авторов

Журнал выходит два раза в год. Статьи, предназначенные для первого номера, принимаются до конца марта, а для второго – до конца сентября текущего года.

Требования к оформлению материалов

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

Объем статьи не должен превышать 0,5 авторского листа (20 000 печатных знаков), включая рисунки, таблицы и список литературы.

Название статьи должно в наиболее краткой форме отражать ее содержание.

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 (если имеется); год окончания и полное название высшего учебного заведения, которое закончил автор; специализация, количество опубликованных научных трудов). Аннотация и сведения об авторах представляются *отдельными файлами*. Следует указать почтовый и электронный *адреса авторов*, а также служебные и домашние номера телефонов. К рукописи прилагается *сопроводительное письмо* организации, в которой работает автор, и один экземпляр *экспертного заключения* о возможности открытого опубликования представленных материалов.

Для написания формул и символов, входящих в формулы, следует использовать редактор формул MS Word.

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

Рисунки представляются *отдельным файлом* в форматах .bmp, .jpg или .gif с разрешением 200-300 точек/дюйм. Все рисунки должны иметь порядковые номера и подписи.

Таблицы должны иметь порядковые номера и названия. Ширина таблицы не должна превышать 140 мм.

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

Адрес редакции: ОАО «ГНИНГИ»,
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41,
Главному редактору журнала "Навигация и гидрография"
Алексееву Сергею Петровичу
Телефон/факс: (812) 322-21-13
E-mail: mail@gningi.ru



НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ, 2009, №28

Научный редактор П. И. Малеев
Редактор И. Ю. Бугрова
Компьютерная верстка: И. А. Власов

Подписано в печать 12.12.2009 г.
Тираж 300 экз.
Заказ № 72/15-09 от 20.12.2009 г.

Журнал зарегистрирован в Федеральном агентстве по печати и массовым коммуникациям.
Свидетельство о регистрации ПИ 013271.

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

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