

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

---

**НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ**

ИЗДАЕТСЯ С 1995 ГОДА

**33  
2012**

**МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

Санкт-Петербург

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

**Редакционная коллегия:**

д. в. н., проф. П. Г. Бродский (первый заместитель главного редактора);  
к. т. н. С. Б. Курсин (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); д. в. н., проф. А. И. Исмаилов;  
д. в. н., проф. В. А. Катенин; к. т. н. Н. И. Леденев; к. т. н. С. И. Мاستрюков;  
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., профессор К. Г. Ставров; д. т. н. С. В. Яценко

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук»

Электронная версия журнала размещена на сайте [www.gningi.ru](http://www.gningi.ru)

**© Открытое акционерное общество**  
**«Государственный научно-исследовательский**  
**навигационно-гидрографический институт»**  
**2012**

**THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC  
INSTITUTE**

---

---

**NAVIGATION AND HYDROGRAPHY**

PUBLISHED SINCE 1995

**33  
2012**

**RUSSIAN FEDERATION MINISTRY OF DEFENCE**

---

---

Saint-Petersburg

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

**Editorial board**

P. Brodsky (first vice-editor-in-chief), DSc, professor;  
S. Kursin (vice-editor-in-chief), CandSc; P. Maleyev, DSc (science editor);  
I. Bugrova (editor), CandSc; V. Bakhmutov (the issue manager), CandSc;  
A. Ismailov, DSc, professor; V. Katenin, DSc, professor; N. Ledenev, CandSc;  
S. Mastryukov, CandSc; 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;  
K. Stavrov, DSc, professor; S. Yatsenko, DSc

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

2012

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Трагедия самоподъемной плавучей буровой установки «Кольская». С. П. Алексеев, С. И. Мاستрюков .....	7
--	---

### НАВИГАЦИЯ

Особенности, состояние и перспективы развития e-Навигации морских объектов. П. И. Малеев, Н. И. Леденев.....	16
Инвариантность теоретически оптимального дискриминатора задержки к направлению смены символов кода сигналов навигационных спутников. А. С. Селиверстов.....	21
Анализ возможности уточнения параметров движения навигационного космического аппарата по измерениям высоты его полёта. А. Д. Голяков.....	28

### ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

Способ оценки качества данных о глубинах для отображения формы рельефа дна. Ю. Н. Жуков .....	36
Критерий корректности вычислений гармонических постоянных методом наименьших квадратов. Ю. Н. Жуков .....	45
О проведении мероприятий безопасности при наличии ледовой угрозы морским сооружениям. Г. А. Лебедев, В. П. Трипольников.....	50

### ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Вероятностная модель штормов и окон погоды. С. И. Мастрюков .....	56
Оценка изменчивости гидрофизических условий в Беринговом проливе по данным американских и российско-американских исследований 1992–2010 гг. С. И. Мастрюков .....	66
Влияние климатических изменений термохалинной структуры Баренцева моря на интенсивность внутренних приливных волн. С. М. Гордеева, А. С. Сафрай, И. В. Ткаченко .....	81

### СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

Герард Меркатор и морская картография. (К 500-летию со дня рождения). В. И. Корякин .....	88
---	----

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ .....	97
---------------------------	----

РЕФЕРАТЫ .....	100
----------------	-----

## C O N T E N T S

<b>Tragedy of the «Kolskaya» Self-elevatory Floating Drilling Rig.</b> S. P. Alekseyev, S. I. Mastryukov .....	7
---	---

### NAVIGATION

<b>Specific Features, State and Prospects of Development for e-Navigation of Maritime Objects.</b> P. I. Maleyev, N. I. Ledenyev .....	16
<b>Invariance of the Theoretically Optimum Delay Discriminator to Direction of the Ranging Code Symbol Change of Navigation Satellites Signals.</b> A. S. Seliverstov .....	21
<b>Analysis of the Possibility to Adjust the Parameters of Navigation Spacecraft Movement Using the Measurement of the Height of its Flight.</b> A. D. Golyakov .....	28

### HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY

<b>Evaluation Method of Depth Data Quality Used to Display the Bottom Configuration.</b> Y. N. Zhukov .....	36
<b>Criterion of Correctness for Calculation of Harmonic Constants by the Least Squares Method.</b> Y. N. Zhukov .....	45
<b>On Safety Measures in the Presence of Ice Hazard for Marine Structures.</b> G. A. Lebedev, V. P. Tripolnikov .....	50

### HYDROMETEOROLOGY

<b>Probabilistic Model of Storms and Good Weather Windows.</b> S. I. Mastryukov .....	56
<b>Evaluation of Variability of Hydrophysical Conditions in the Bering Strait based on the data of the American and Russian-American Explorations in 1992–2010.</b> S. I. Mastryukov .....	66
<b>Influence of Climatic Trend of the Barents Sea Thermohaline Structure on the Internal Tides Intensity.</b> S. M. Gordeeva, A. S. Safray, I. V. Tkachenko .....	81

### PAGES OF HISTORY

<b>Gerhard Mercator and Marine Cartography (On the Occasion of the 500-th Anniversary of His Birthday).</b> V. I. Koryakin .....	88
--	----

<b>INFORMATION ABOUT AUTHORS</b> .....	97
--	----

<b>ABSTRACTS</b> .....	100
------------------------	-----

**ТРАГЕДИЯ САМОПОДЪЕМНОЙ ПЛАВУЧЕЙ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ  
«КОЛЬСКАЯ»****С. П. АЛЕКСЕЕВ, С. И. МАСТРЮКОВ**  
(ОАО «ГНИНГИ»)

*Проанализировано состояние погодных условий и качество учета гидрометеорологических условий при планировании операции по буксировке самоподъемной буровой установки «Кольская» в декабре 2011 г. Сделан вывод о том, что заблаговременное планирование буксировки было осуществлено без учета особенностей ветро-волнового режима Охотского моря, что могло стать первопричиной трагедии.*

18 декабря 2011 г. при буксировке в Охотском море перевернулась и через час затонула самоподъемная плавучая буровая установка (СПБУ) «Кольская». Погибло несколько десятков людей. Это одна из крупнейших морских катастроф. По факту гибели людей возбуждено уголовное дело по ч. 3 ст. 263 УК РФ (нарушение правил безопасности движения и эксплуатации транспорта, повлекшее смерть двух и более лиц). Следственный комитет России уже выдвинул версии по поводу причин трагедии, одной из них является нарушение правил буксировки – «буксировка без учета погодных условий». Представляется, что без участия специалистов получить объективную оценку случившегося и, главное, сделать неформальные выводы, направленные на повышение безопасности таких сложных транспортных операций, невозможно.

Для оценки качества заблаговременного планирования операции потребовалось выполнить реконструкцию событий и анализ погодных условий по маршруту буксировки. Основное внимание уделено оценке скорости буксировки и принятым на буксировку критическим значениям штормовых условий. С использованием полученных оценок выполнен расчет окон погоды для центральной части Охотского моря в декабре. Оценена степень брызгового обледенения и возможность его влияния на буксировку. Ввиду отсутствия доступа ко всей имеющейся информации, полученные результаты в известной степени носят оценочный характер и при наличии более точных сведений могут быть уточнены.

**Справка**

СПБУ «Кольская» построена в Финляндии на судовой верфи «Раума Репола» в 1985 году. Общая длина установки (включая вертолётную площадку) – 69,25 м, ширина – 80,00 м. Назначение – разведка местонахождений нефти и газа на морских шельфах на глубинах до 100 м. Владелец – государственная компания ОАО «Арктикморнефтегазразведка» (г. Мурманск). 26 августа 2011 г. на транспортном судне «Траншельф» СПБУ была доставлена из Мурманска в Магадан. До декабря СПБУ проводила бурение скважины №1 «Первоочередная» на шельфе западного побережья Камчатки. После разведочного бурения на скважине предполагалось отбуксировать буровую в бухту Зырянская на западном побережье о. Сахалин, а затем доставить во Вьетнам для выполнения заказа от Вьетсовпетро.

### ***Реконструкция событий***

Буксировку вели ледокол «Магадан» и судно обеспечения «Нефтегаз-55». Шли Охотским морем от западного побережья Камчатки в бухту Зырянская острова Сахалин.

По неофициальным данным буксировка началась 11 декабря 2011 года. Так, автор под ником Denshkv на Форуме портала Мореход [1] со ссылкой на беседу с участником операции пишет: «А с погодой – была более менее в первые два дня 11 вечером и 12, а далее всё хуже! Точно не помню, по моему пару дней ДО ЭТОГО (то есть 16.12.2011) развернулись на север и удерживались на полном ходу, а нас несло 1–1,5 уз на юг. ... ноги (опоры) не было возможности опустить».

Это сообщение подтверждается заявлением главного инженера «Арктикморнефтегазразведки» Леонида Бордзиловского [2]: «в ночь с 16 на 17 декабря из-за ухудшения погоды руководитель буксировки принял решение дрейфовать в сторону Курильских островов».

По сообщениям Госморспасслужбы на портале Федерального агентства Морского и речного флота [3] в 02.24 (МСК) 18 декабря 2011 г. по донесению МСПЦ Южно-Сахалинск получен сигнал бедствия СПБУ «Кольская». СПБУ и суда, производящие буксировку, находились в Охотском море (145 миль северо-восточнее мыса Терпения). В процессе буксировки произошло разрушение газоотводящих трубок танков №№35, 37 и туда начала поступать вода, судовые водоотливные средства работали на пределе. Был поврежден буксирный трос ледокола «Магадан», и буровую развернуло или подвернуло бортом к волне. Волной выбило иллюминаторы в столовой команды, вода стала поступать в помещение. Судно обеспечения «Нефтегаз-55» получило трещину в корпусе. В 05.45 СПБУ «Кольская» получила крен и в течение 20 минут затонула. Последовательность событий, связанных с разрушениями на СПБУ, точно не установлена.

### ***О гидрометеорологическом обеспечении буксировки***

По словам исполняющего обязанности генерального директора ОАО «Арктикморнефтегазразведка» Юрия Станиславовича Мелехова «все необходимые материалы для оценки пятидневного прогноза погоды передавал Южно-Сахалинский гидрометцентр... На момент выхода был получен благоприятный пятисуточный прогноз. Об ухудшении погодных условий знали заблаговременно. И решения принимались исходя из видимости на точке буксировки» [4]. Сведения о том, было ли организовано специализированное гидрометеорологическое обеспечение буксировки, отсутствуют.

### ***Оценка расчетной скорости и продолжительности буксировки***

Расстояние от места выхода до точки гибели составляет около 440 миль, судя по реконструкции буксировки, это расстояние было пройдено за 7 суток (с 11 по 18 декабря). Следовательно, средняя скорость буксировки по запланированному маршруту составила около 2,5 узлов. Даже при скорости буксировки 5 узлов запланированное время буксировки по всему маршруту от западного побережья Камчатки до бухты Зырянская должно было составить не менее 8 суток, а время буксировки от западного побережья Камчатки до залива Терпения (около 660 миль) как вероятного места штормового отстоя – около 5 суток. При учете того, что заблаговременность информативного прогноза гидрометеорологических условий не превышает двух суток, точка принятия решения о возвращении в место выхода (если не учитывать влияние ветра и волнения на скорость буксировки) в



случае штормового предупреждения при расчетной скорости буксировки 5 узлов лежит на удалении 240 миль от Камчатки, а точка принятия решения о продолжении движения в ближайшее место штормового отстоя лежит на удалении 240 миль от мыса Терпения. Таким образом, если даже было получено штормовое предупреждение с заблаговременностью 2 суток об ожидающихся штормовых условиях по маршруту буксировки, на участке маршрута в «мертвой» зоне протяженностью около 150 миль между указанными точками, любое действие руководителя буксировки не позволяло избежать попадания буксирного ордера в шторм.

При планировании операции по буксировке необходимо было выбрать состав буксирного ордера таким образом, чтобы он обеспечивал гарантированное перемещение ордера в места штормового отстоя из любой точки на маршруте при согласованной с подразделениями Росгидромета заблаговременности штормового предупреждения.

#### ***Оценка критических значений гидрометеорологических условий на буксировку***

При заблаговременном планировании сложных транспортных операций, наряду со сведениями о скорости буксировки, о непрерывной продолжительности благоприятных условий (окон погоды) необходимо задать (знать) нормативные ограничения по гидрометеорологическим условиям. Официальных сведений о принятых на буксировку критических значениях ветра и волнения не найдено. По сообщению М. Войтенко, размещенному на Портале «Морской бюллетень Совфрахт» [5], со ссылкой на одну из газет указано, что «ограничение на перегон Кольской – 5 баллов по волнению и 7 баллов по ветру».

Это означает, что предельная высота волнения 3%-ной обеспеченности на буксировку СПБУ составляла 3,5 м, а скорость ветра – 15 м/с. Именно эти условия ниже будут считаться штормовыми для буксировки СПБУ.

#### ***Оценка гидрометеорологических условий***

Сведения о погоде в период буксировки, приводимые в разных источниках, как это часто бывает, существенно различаются. Приводятся сведения о скорости ветра в диапазоне от 18 до 25 м/с, а волнения от 4–5 м до 6–7 м и даже до 12 м. Достоверно известно, что через сутки после гибели буровой, по данным Госморспасслужбы, скорость ветра была 10 м/с в секунду, волнение до 2 м. Температура воздуха в период буксировки составляла  $-7^{\circ}\text{C}$ , в месте гибели СПБУ она повысилась до  $-5^{\circ}\text{C}$ . Соленость воды была около 33‰, температура воды 1–2°C.

На портале Метеоновости [6] размещены обзоры погоды по Охотскому морю следующего содержания:

«10:46 Пятница, 16 декабря. Активный циклон и связанные с ним атмосферные фронты стали причиной непогоды на Дальнем Востоке. Минувшей ночью циклон располагался над центром Камчатского полуострова. В Камчатском крае отмечалась продолжительная метель при ветре до 23 м/с, на юге территории прошли сильные снегопады, выпало до 23 мм осадков. Ухудшилась погода и в прибрежных районах Магаданской области, где ветер достигал почти ураганных скоростей – 29 м/с, отмечалась метель. В ближайшие сутки циклон сместится на акваторию Охотского моря, процессы станут менее интенсивными. В Камчатском крае пройдет небольшой и умеренный снег, сила ветра – от 7 до 12 м/с. На охотском побережье Магаданской области ветер ослабеет до 9–14 м/с.

14:02 Воскресенье, 18 декабря. В Охотском море перевернулась буровая платформа «Кольская», на борту которой находились 67 человек, из которых 14 человек были спасены. По данным Сахалинского регионального управления гидрометеоцентра, метеорологические условия на акватории Охотского моря сложные. Акваторию моря пересекает холодный атмосферный фронт. В зоне бедствия из-за сильного ветра (до 20 м/с) высота волн достигает шести метров, температура воды – около ноля градусов по Цельсию».

Единственным доступным для авторов объективным источником информации о гидрометеорологических условиях собственно в Охотском море в период с 12 по 18 декабря 2011 г. являются карты приземного анализа Японского метеорологического агентства [7]. Фрагменты этих карт за 12, 16 и 18 декабря 2011 г. приведены в еженедельном обзоре специалистов Магаданского научно-исследовательский института рыбного хозяйства и океанографии [8].

Карты приземного давления на район буксировки представлены на рис. 1. Там же приведены оценки скорости ветра и высоты волнения 3%-ной обеспеченности, полученные путем расчета на основе рекомендаций [9, 10].

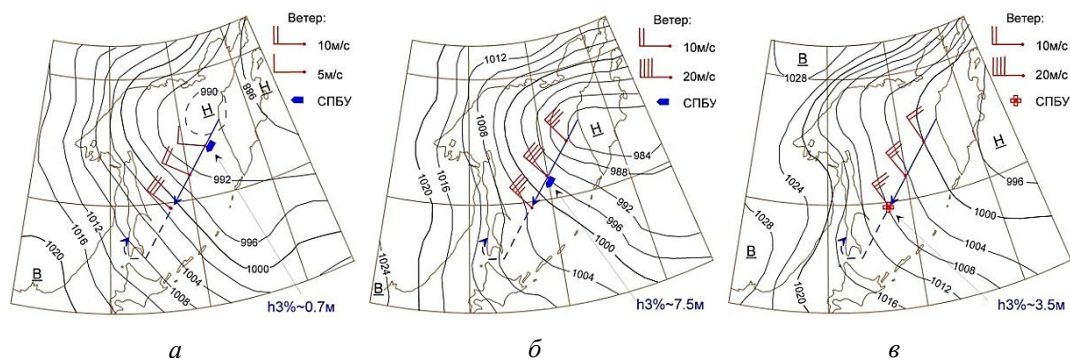


Рис. 1. Карты приземного давления 12 декабря (а), 16 декабря (б) и 18 декабря (в) 2011 г.

В начале буксировки 12 декабря наблюдался ветер от ЗСЗ, скоростью около 5 м/с, средняя высота волнения не превышала полуметра (высота волн 3%-ной обеспеченности  $h_{3\%} \sim 0,7\text{м}$ ). По мере движения по маршруту после 12 декабря ветер и волнение усиливались. 16 декабря ветер развернулся на СЗ и усилился до 19–20 м/с, что вызвало увеличение средней высоты волнения до 3,8 метра ( $h_{3\%} \sim 7,5\text{м}$ ). К 18 декабря (дате гибели СПБУ «Кольская») скорость ветра снизилась до 12 м/с, а средняя высота волнения – до 1,8м ( $h_{3\%} \sim 3,5\text{м}$ ), ветер развернулся на ССЗ. Порывы ветра 16 декабря в месте нахождения буксирного ордера при средней скорости ветра 19 м/с [10] могли достигать 27 м/с.

Описанные гидрометеорологические условия при отрицательной температуре воздуха должны были способствовать развитию брызгового обледенения.

Из различных видов обледенения брызговое является наиболее распространённым и составляет более 90 % всех случаев обледенения, в то же время оно наиболее опасно из-за неравномерного нарастания льда. Во время хода судна от ударов корпуса о волны образуются брызги, которые оседают на корпусе судна и замерзают, если температура воздуха отрицательная. Предельная высота обледенения конструкций судна зависит от скорости ветра и высоты волн и редко

превышает 20 м. Чем больше скорость ветра и высота волн, тем выше летят брызги морской воды, следовательно, выше распространяется обледенение.

Брызговое обледенение могло привести к нарушению остойчивости СПБУ и появлению крена. Обледенение конструкций могло нарушить планы по опусканию опор (ног) СПБУ для придания конструкции дополнительной остойчивости.

Для расчета интенсивности брызгового обледенения использован метод Д. Оверлэнда, описанный в работе [11]. В отличие от отечественного метода, основанного на учете двух факторов приводящих к обледенению – температуры воздуха и скорости ветра, этот метод считается более точным, поскольку позволяет дополнительно учесть температуру воды и температуру замерзания морской воды. Метод построен на обобщении сообщений об обледенении судов длиной 20–75 метров и поэтому, строго говоря, применим к судам таких размеров. Но других методов расчета, в том числе для конструкций типа СПБУ «Кольская» ни в нашей стране, ни за рубежом нет. На первом этапе выполняется расчет так называемого показателя обледенения  $PPR$  как функции от скорости ветра  $V$ , температуры воздуха  $T_a$ , температуры воды  $T_w$  и температуры замерзания воды  $T_f$ . После определения величины показателя обледенения  $PPR$  оценивается тип и скорость обледенения  $R_i$ . Результаты расчета приведены в таблице.

#### **Оценка интенсивности брызгового обледенения**

дата	$S, \%$	$T_f, ^\circ C$	$T_w, ^\circ C$	$T_a, ^\circ C$	$V, \text{ м/с}$	$PPR$	тип	$R_i, \text{ см/час}$
12.12.2011	33	-1.8	2	-7	5	12	легкое	0,2
16.12.2011	33	-1.8	2	-7	19	46	умеренное	1,5
18.12.2011	33	-1.8	2	-5	12	18	легкое	0,3

Таким образом, 15–17 декабря 2011 г. по маршруту буксировки сложились условия для развития умеренного обледенения со скоростью нарастания льда до 1,5 см/час, отложения льда могли происходить преимущественно на наветренном (правом) борту на основании платформы и в нижней части опорных колонн. Это за счет неравномерного нарастания льда наряду с другими факторами могло привести к нарушению остойчивости платформы, появлению крена, снижению скорости буксировки, а также могло затруднить или даже исключить опускание опор платформы для придания ей дополнительной остойчивости.

Оценим в какой степени наблюдавшиеся 16 декабря 2011 года штормовые условия характерны для Охотского моря, и на какое число окон погоды можно было рассчитывать при заблаговременном планировании операции по буксировке на декабрь месяц.

#### **Оценка гидрометеорологического режима по маршруту буксировки в декабре**

Согласно источникам [12, 13] повторяемость очень быстрого обледенения в декабре по маршруту буксировки составляет 15%. Повторяемость видимости менее одного кабельтова невелика и составляет около 3%. Повторяемость ветра скоростью ( $V$ ) 15 м/с и более по разным оценкам [12–14] в декабре составляет 15–20%. Максимальные скорости ветра по маршруту буксировки зимой достигают 40 м/с. Повторяемость волнения 3%-ной обеспеченности – 3,5 м и более зимой в центральной части моря по разным оценкам составляет 10–15% [15–16]. Максимальные высоты волн в центральной части моря достигают 13 м. По результатам обработки судовых наблюдений из базы данных НИОЦ

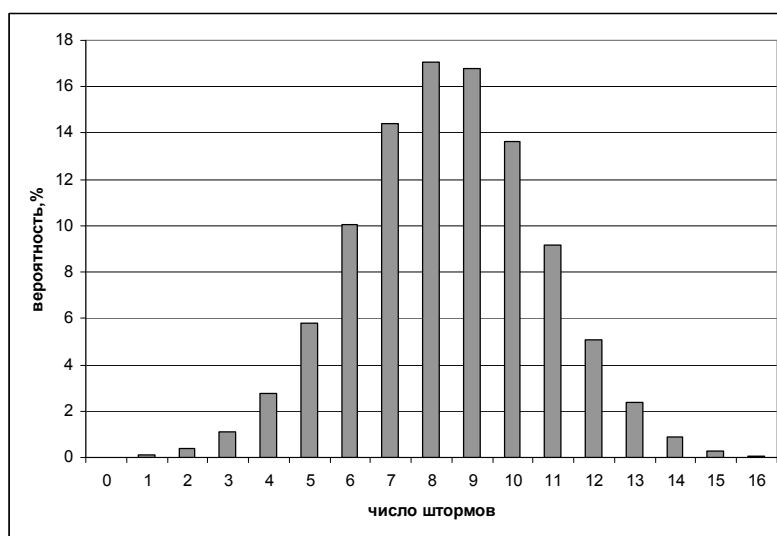
ОАО «ГНИНГИ» в центральной части Охотского моря в декабре вероятность скорости ветра 15 м/с и более составляет 18%, волнения 3,5 м и более – 10%, повторяемость скорости ветра 15 м/с и более или высоты волнения 3,5 м и более – 23%. То есть вероятность штормовых условий для буксировки буровой в декабре достигает 23%.

Для расчета характеристик окон погоды необходимо знать их продолжительность. За продолжительность окна погоды примем время, необходимое для буксировки по маршруту от западного побережья Камчатки до залива Терпения при скорости буксировки – 3 узла и возможных скоростях 5 и 7 узлов (при усилении буксирного ордера). Для приведенного набора скоростей примерное время буксировки составит 200, 120 и 85 часов соответственно. Ниже для повторяемости заданного сочетания ограничивающих условий и трех скоростей буксировки приведены результаты расчета числа окон погоды.

**Расчет характеристик окон погоды для буксировки СПБУ «Кольская»**

Методическая основа расчета характеристик окон погоды изложена в работах [16, 17]. Отметим, что в практике работ ОАО «ГНИНГИ» используются и другие подходы к оценке характеристик окон погоды при заблаговременном планировании сложных морских транспортных операций.

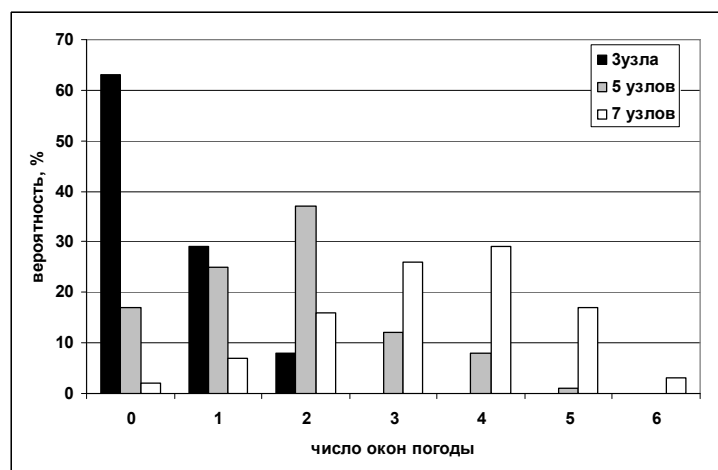
При повторяемости штормовых условий 23% среднее число штормов за месяц составляет около 8,5, при таком уровне повторяемости распределение числа штормов подчиняется нормальному закону распределения. Функция плотности распределения числа штормов (вероятность) штормов приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Плотность распределения числа штормов при повторяемости штормовых условий 23% (декабрь, центральная часть Охотского моря)**

Как видим, в центральной части Охотского моря в декабре может наблюдаться от одного до 16 штормов. Вероятность того, что число штормов будет, например, менее трех составляет примерно 1%. С вероятностью около 70% в декабре отмечается от 6 до 11 штормов (скорость ветра 15 м/с и более или высота волнения 3,5 м и более) в месяц.

На рис. 3 приведены результаты расчета вероятности числа окон погоды в декабре при заданной продолжительности (200, 120 и 85 часов) окон погоды пригодных для буксировки от побережья Камчатки до залива Терпения при скоростях буксировки 3,5 и 7 узлов.



**Рис. 3. Плотность распределения числа окон погоды заданной продолжительности (200, 120 и 85 часов) пригодных для буксировки от побережья Камчатки до залива Терпения при скоростях буксировки 3, 5 и 7 узлов в декабре**

На рис. 3 можно видеть, что в 63 года из 100 лет при скорости буксировки 3 узла в декабре месяце не будет ни одного окна погоды, в 29 лет из 100 будет одно окно погоды, и только в 8 лет из ста будет два окна погоды. Это означает, что даже при идеальном гидрометеорологическом обеспечении пройти в декабре по маршруту со скоростью 3 узла при принятых ограничениях по ветру и волнению (даже без учета возможности обледенения и иных опасных явлений) можно всего один раз в три года. При той скорости, которая была у буксирного ордера (2,5 узла) одно окно погоды по ветру и волнению отмечается один раз в 4 года. Это практически исключает возможность успешного выполнения буксировки в этот период с заданной скоростью буксировки и с заданными ограничениями по ветро-волновым условиям.

При увеличении скорости буксировки до 7 узлов среднее число окон погоды, пригодных для перехода по маршруту возрастает до 3,5, но и при этой скорости в один год из 10 будет всего одно окно погоды или их не будет вообще.

**Анализ полученных результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:**

– при фактической скорости буксировки СПБУ «Кольская» ледоколом «Магадан» и судном обеспечения «Нефтегаз-55» (2,5 узла) и принятых ограничениях на буксировку (15 м/с по ветру и 3,5 м по волнению) независимо от времени выхода с западного побережья Камчатки буксирный ордер практически не мог в декабре месяце благополучно дойти не только до бухты Зарянская, но и до залива Терпения.

– только при скорости буксировки 7 узлов и предполагаемых ограничениях (15 м/с по ветру и 3,5 м по волнению) имелась бы возможность найти 1 окно погоды в месяц для прохода по всему маршруту или 3–4 окна погоды в месяц для прохода до бухты Терпения.

– для обеспечения безопасности скорость буксировки должна была составлять 7 узлов, а критерии штормовых условий должны были быть увеличены по скорости ветра до 18 м/с, а по высоте волнения до 6 м.

– даже при выполнении указанных требований необходимо было организовать полноценное специализированное гидрометеорологическое обеспечение.

Учитывая, что повышение скорости буксировки и предельных значений ограничивающих факторов среды может потребовать слишком больших материальных затрат, в такого рода случаях следует просчитывать эффективность использования других способов перемещения, например, транспортировки специализированными судами типа «Траншельф». Отметим, что положительный опыт транспортировки СПБУ «Кольская» в 2011 г. от Мурманска до Магадана по трем океанам – Атлантическому, Индийскому и Тихому и трассе общей протяженностью 19 тысяч морских миль не был использован.

Таким образом, в процессе буксировки СПБУ «Кольская» 15–17 декабря 2011 г. скорость ветра и высота волнения превысили предполагаемые ограничения на буксировку, что в сочетании с обледенением и другими факторами в конечном итоге привело к потере контроля над ситуацией и катастрофе. Ошибки были совершены не в процессе буксировки, а на этапе ее планирования. Планирование транспортной операции было выполнено без должного учета ветро-волнового режима акватории Охотского моря. При выбранном наряде сил буксировки и ограничениях по ветру и волнению транспортная операция была изначально обречена на неудачу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Портал Мореход. URL <http://www.morehod.ru/forum/offshore-supply/gibelj-burovoy-koljskaja-t22602-150.html#p441436>.
2. Портал РИА «Новости»: URL <http://www.ria.ru/incidents/20111219/520843186.html>
3. Портал Федерального агентства Морского и речного флота. URL <http://www.morflot.ru>
4. Портал ОАО «Арктикморнефтегазразведка». URL <http://www.amngr.ru/>.
5. Портал «Морской бюллетень Совфракт». URL <http://www.sovfracht.info/?PageID=3795>
6. Портал Метеонювости. URL: <http://meteonovosti.ru/>.
7. Портал Японского метеорологического агентства. URL: <http://www.jma.go.jp/en>
8. Портал МагаданНИРО: Краткий обзор обстановки на промысле сельди и минтая в период с 12 по 18 декабря 2011 г. URL <http://www.magniro.ru/promobzori/>
9. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов): СНИП 2.06.04-82// Госстрой СССР/ Стройиздат., – М., 1986. – 40 с.
10. Coastal Engineering Manuals [Electronic resource] // U.S. Army corps of engineers. – Part II. – Ch. 2: Meteorology and wave climate. – 2006. – 74 p. – (Access conditions: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/>).
11. Мастрюков С. И. Оценка отечественных и зарубежных методов расчета брызгового обледенения судов // Навигация и гидрография, 2011, № 31. С. 81–86.
12. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 9. Охотское море. Вып. 1 Гидрометеорологические условия // - Л., Гидрометеониздат, 1998. – 342 с.
13. Лоция Охотского моря// – СПб.: Изд-во. ГУНиО МО, 1998. – 390 с.
14. Портал ЕСИМО: Климат Охотского моря . URL <http://esimo.oceanography.ru/>
15. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные / под ред. И. Н. Давидана // Регистр СССР/– Л.: Транспорт, 1974. – 360 с.
16. Справочные данные по режиму ветров и волнения на морях, омывающих берега СССР// Регистр СССР/ – Л.: Морской транспорт, 1962. – 154 с.
17. Мастрюков С. И. Имитационное моделирование статистических характеристик окон погоды в интересах планирования морских операций// Навигация и гидрография. – 1998. – 6. – С. 84–89.
18. Мастрюков С. И. Вероятностная модель штормов и окон погоды по ветровым условиям // Навигация и гидрография. – 2012. – № 33. – С. 56–66.

**TRAGEDY OF THE «KOLSKAYA» SELF-ELEVATORY FLOATING DRILLING RIG**

**S. P. Alekseyev, S. I. Mastryukov** («GNINGI» OJSC)

*The weather conditions and quality of due regard for the hydrometeorological conditions when planning the operation of towing the «Kolskaya» drilling rig in December 2011 are analysed. The following conclusion has been drawn: the preliminary planning of the towing operation was carried out without due regard for the specific features of the wind and wave regime of the Sea of Okhotsk, which could become the prime cause of the tragedy.*

---

# НАВИГАЦИЯ

---

УДК 629.783.527

## **ОСОБЕННОСТИ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ e-НАВИГАЦИИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ**

**П. И. МАЛЕЕВ, Н. И. ЛЕДЕНЕВ**  
(ОАО «ГНИНГИ»)

*Усложнение в последние годы условий мирового морского судоходства ведет к повышению требований к навигации. Развитие электроники, вычислительной техники и связи указывают на возможность удовлетворения этих требований, что позволит значительно повысить безопасность мореплавания. Это дало начало разработкам новой концепции навигации, получившей название e-Навигации. В статье рассмотрены основные задачи, стоящие перед e-Навигацией, необходимость и последовательность их решения, ожидаемые преимущества по сравнению с существующими средствами, состояние и перспективы развития.*

e-Навигация относительно новая широко обсуждаемая концепция [1–7]. Одной из первых публикаций о ней была статья в настоящем журнале за 2002 г. [1]. Эта концепция является дальнейшим развитием навигации на основе существующих и новых навигационных средств, в частности, электронных карт и систем позиционирования. Наличие приставки «е» означает расширение возможностей навигации в современных условиях на основе электроники и является начальной буквой английского слова «enhanced» – увеличенный, усиленный, усовершенствованный. Официально концепция e-Навигации была представлена в Международную морскую организацию (ИМО) в декабре 2005 г. группой ее членов. В основу этой концепции были положены: координация, сбор, интеграция, передача и представление информации о ситуации на море. Ее цель – повышение эффективности навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения (НГО и ГМО) безопасности плавания, организации поиска и спасения терпящих бедствия кораблей и судов за счет комплексного использования существующих и разрабатываемых средств и соединения судоводителей (штурманов) и операторов Службы регулирования движения судов (VTS) для совместного использования информации.

В 2006 г. концепция e-Навигации получила поддержку на конференции Международной Ассоциации маячных служб (МАМС). Затем, в июле 2006 г. вопрос о e-Навигации был внесен в рабочую программу NAV 52 для предварительного обсуждения. По результатам обсуждения было принято решение об учреждении Координационной группы ИМО. В ее состав вошло более 60 представителей морских



стран Мира. В работе этой группы принимают участие национальные группы и организации, а также международный Комитет по е-Навигации МАМС, состоящий из специалистов и технических экспертов разных стран.

В июле 2007 г. подкомитетом NAV 53 ИМО были определены основные цели концепции е-Навигации и было поручено Координационной группе установить всех потенциальных пользователей е-Навигации и их требования к ней [2]. Группа приняла решение рассматривать е-Навигацию не как физические средства и не как предоставляемые услуги, а как стратегическую основу для развития существующей и будущей технологической инфраструктуры на судне и на берегу. Основной целью выбора стратегии развития навигации принимается снижение уровня ошибок при решении навигационных задач. Понятие «навигация» здесь трактуется расширенно и включает в себя всё, имеющее отношение к обеспечению безопасности мореплавания.

В июле 2008 г. 54-я сессия Подкомитета по безопасности мореплаванию (ПКБМ НАВ-54) ИМО приняла проект «Стратегии по разработке и внедрению е-Навигации» [3]. В соответствии с этим проектом е-Навигация представляет собой «Гармонизированные мероприятия по интеграции, обмену, представлению и анализу информации, касающейся судоходства, на судах и береговых объектах с помощью электронных средств для совершенствования мореплавания и повышения эффективности, связанных с ним служб обеспечения безопасности, охраны на море и защиты морской окружающей среды». Особая роль в стратегии е-Навигации отводится так называемому «человеческому фактору». Отмечается, что основной причиной более чем 60% кораблекрушений является человеческий фактор, в том числе и по причине неадекватного психологического и физиологического состояния персонала.

Позднее этот проект «Стратегии» был представлен для рассмотрения и одобрения на 85-ой сессии Комитета по безопасности на море (КБМ-85), а также с целью выработки общего плана действий по внедрению этой концепции. В настоящее время установлен срок реализации плана – 2014 год [4]. Для полного внедрения концепции она должна стать обязательной для всех стран, подписавших требования Международной конвенции СОЛАС.

Концепция направлена на развитие бортовых навигационных систем, береговых систем и инфраструктуры связи. Бортовые системы, включающие датчики, вырабатывающие информацию, стандартный интерфейс и систему управления охранными зонами и оповещения планируется объединить в единый интегрированный комплекс. Базовыми элементами такого комплекса должны быть средства определения местоположения объекта, электронные навигационные карты, а также средства и способы обработки навигационной информации, позволяющие снизить как нагрузку на судоводителя, так и влияние человеческого фактора на принятие решения. Комплекс должен быть привлекательной альтернативой разрозненным навигационным средствам, которые судно обязано иметь в соответствии с требованиями Главы 5 международной конвенции об охране человеческой жизни на море (СОЛАС-74). Для этого обязательно нужно разработать согласованные международные требования. Стоимость комплекса не должна превышать суммарную стоимость различных навигационных средств судна, которые в настоящее время они обязаны иметь в соответствии с требованиями Главы 5 СОЛАС.

Основными требованиями к средствам определения местоположения в е-Навигации являются [5]:

- соответствующие точность, доступность, непрерывность и целостность;
- достаточное резервирование;
- совместимость систем;
- соответствующие исходные геодезические данные.

Береговые системы должны быть усовершенствованы путем координации данных, обеспечивающих безопасность и эффективность движения морских судов.

Инфраструктура связи должна обеспечивать прямую передачу информации между кораблем и берегом, а также между береговыми службами.

Необходимость реализации концепции е-Навигации вызвана возрастанием:

- требований к получению информации от судов для уменьшения рисков, которые они создают;
- требований к судам со стороны прибрежных государств.
- объема информации, которой обмениваются суда и береговые организации;
- тенденции к региональному сотрудничеству между прибрежными государствами;
- требований к охране окружающей среды и судам, перевозящим грузы;
- требований к качеству обслуживающего персонала и т. п.

е-Навигация – это комплексная концепция, которая объединяет различные заинтересованные стороны и может оказать влияние на морское судоходство в целом. Она затрагивает интересы моряков, лоцманов, предприятий, разрабатывающих средства навигации, связи и другое морское оборудование, служб управления движением судов, прибрежные государства, гидрографические организации, владельцев судов и др.

Основными задачами е-Навигации по данным ИМО являются [2, 4]:

- обеспечение безопасного движения судов с учетом гидрографической, метеорологической и навигационной информации и рисков;
- содействие наблюдению и управлению судоходством с береговых средств в тех случаях, когда это целесообразно;
- содействие связи, включая передачу информации между судами, судном и берегом, между береговыми службами и другими пользователями;
- обеспечение повышения эффективности перевозок транспортом и логистики;
- обеспечение высокого уровня реагирования на аварийные ситуации, а также эффективной работы поисковых и спасательных служб;
- обеспечение необходимого уровня точности, целостности и непрерывности систем с особыми требованиями к безопасности;
- объединение и воспроизведение информации бортовых и береговых систем посредством интерфейса оператора, что позволит максимально повысить уровень безопасности судоходства и минимизировать риск возникновения неверного толкования информации пользователем;
- интеграция и представление информации на судне и на берегу для управления рабочей нагрузкой пользователей и обеспечения принятия решений;
- включение требований по обучению и ознакомлению пользователей во время всего процесса разработки и внедрения концепции;
- содействие глобальному охвату соответствующих стандартов и договоренностей по совместимости и возможному взаимному использованию

оборудования, систем, условных знаков и эксплуатационных процедур для исключения конфликтов между пользователями;

– обеспечение возможности наращивания функций и доступности для всех морских пользователей.

В соответствии со Стратегией ИМО ожидаются следующие преимущества е-Навигации:

1. *Повышение безопасности за счет:*

– повышенного обеспечения для принятия решения, создающего возможность для мореплавателей и компетентных властей на берегу выбора соответствующей однозначной информации в данной ситуации;

– уменьшения ошибок, допускаемых человеком, путем обеспечения автоматических индикаторов, предупреждений и безотказных методов;

– использования стандартизованного оборудования;

– улучшения интеграции судовых и береговых систем.

2. *Улучшение защиты окружающей среды путем:*

– снижения риска столкновений и посадок на мель и связанных с ними разливов нефти и загрязнений;

– использования оптимальных маршрутов и скоростей движения судов;

– увеличения возможности реагирования и действий в таких чрезвычайных условиях как разлив нефти.

3. *Повышение эффективности и снижение расходов за счет:*

– глобальной стандартизации оборудования;

– автоматизированных и стандартизованных процедур сообщения, приводящих к сокращению административных расходов;

– улучшения работы на мостике, дающей вахтенному возможность использовать время для должного наблюдения и использования более одного метода определения местоположения судна.

е-Навигация – это поэтапная динамически развивающаяся концепция, которая будет постоянно дорабатываться по мере появления новых задач и требований пользователей, а также технологические возможности для их решения. Базовыми элементами е-Навигации в настоящее время являются интегрированные навигационные системы (ИНС), интегрированные системы ходового мостика (ИСХМ) и электронные картографические навигационно-информационные системы (ЭКНИС). Разработан эксплуатационный стандарт на интегрированный навигационный дисплей, предусматривающий интеграцию информации от радиолокационных станций (РЛС), автоматические идентификационные системы (АИС) и ЭКНИС. Решен вопрос об обязательном оснащении всех морских судов электронными картографическими системами. Международная электротехническая комиссия (МЭК) разработала стандарт на береговое оборудование АИС [3] Одной из новых разработок, выполняемых в рамках концепции е-Навигации согласно «требованиям пользователей», является проект Морского института под названием Режим-S (S-Mode), в котором предлагается согласовать требования по стандартизации с необходимостью постоянного технического и инновационного развития [6].

В соответствии с Режимом-S все навигационные индикаторы, независимо от производителя, должны быть снабжены четко различимой кнопкой, при нажатии которой все индикаторы переводятся в стандартный формат, поддерживающий

стандартную систему управления с меню, стандартный интерфейс (например, клавиатура/джойстик и т. д.) и базовые функции.

В процессе реализации стратегии е-Навигации большое внимание должно быть уделено технологическим решениям, связанным с обменом информацией. Ожидается, что для этой цели может быть применена и новая технология беспроводного доступа Wi-Max, которая позволит обеспечить качественную цифровую связь в направлении «судно-берег», «берег-судно», «судно 1-берег-судно 2» при нахождении судов в зоне действия базовых станций. Применение технологии Wi-Max открывает широкие возможности для передачи на суда и другой информации, в частности, относящейся к навигации и метеорологии. Появится возможность осуществить доступ экипажа и к сети Интернет, телефонной сети общего пользования и т. д. Береговые службы также смогут получать необходимую навигационную информацию с судна в реальном масштабе времени.

Другим важным направлением реализации е-Навигации является необходимость создания глобальной полноценной коллекции морских электронных навигационных карт и пособий, доступных любым пользователям. Подкомитет НАВ-54 при принятии Стратегии рекомендовал Международной гидрографической организации (МГО) и Правительствам – членам ИМО приложить дополнительные усилия для увеличения районов покрытия электронными навигационными картами и для повышения их качества. Поправками к Правилу 19 Главы 5 Конвенции СОЛАС, которые были подготовлены НАВ-54 и направлены на рассмотрение и одобрение КБМ-85, обязательное оснащение конвенционных судов аппаратурой ЭКНИС предполагается произвести в период с 2012 по 2017 гг. (в зависимости от типов судов и их валовой вместимости) [3].

Таким образом, концепция е-Навигации предусматривает комплексное использование современных технологий на базе электроники с целью повышения эффективности НГО и ГМО безопасности мореплавания. Это поэтапная динамически развивающаяся концепция, которая будет постоянно дорабатываться по мере того, как будут появляться новые задачи и требования пользователей, а также технологические возможности для их решения. В настоящее время следовать концепции е-Навигации означает, прежде всего, участвовать и быть в курсе процессов формирования требований потребителей, разработки стандартов на составные части и систему морской навигации в целом, своевременно учитывать эти требования и стандарты в своих разработках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Елагин А. В. E-navigation: научно-практический прогноз // Навигация и гидрография. – 2002. №15. – С. 9–20.
2. David J. Patraiko // European Journal Of Navigation-Vol. 5, No 5, Novemder 2007.
3. Головки В. И. Виртуальная среда, объединяющая мир. Реализация концепции e-Navigation – новый уровень обеспечения безопасности мореплавания // Судоходство. – 2009. –№2 (28). – С. 1217.
4. <http://www.iala-aism.prg/iala/FAQS/FAQse-nav.pdf>.
5. Pillich B. Developing e-Navigation the early stages // URL <http://www.thsoa.org/us07papers.htm>.
6. Patriko D. Introducing the e-navigation revolution // URL <http://www.ifsma.org/tempannounce/aga33/Enav.pdf>
7. e-Navigation // URL <http://www.imo.org/ourwork/safety/navigation/pages/enavigation.aspx>.

**SPECIFIC FEATURES, STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT FOR e-NAVIGATION OF MARITIME OBJECT**

**P. I. Maleyev, N. I. Ledenyev** («GNINGI» OJSC)

*The increasing complexity of conditions for the global maritime navigation results in the enhanced requirements to navigation. The development of electronics, computing technology and communications shows the possibility to satisfy these requirements and thus to increase, to a considerable degree, the safety of navigation. This gave rise to development of the new concept of navigation called e-Navigation. The main tasks of the concept, the necessity and sequence of their solutions, the expected benefits as compared to the existing means, the state and prospects of development are considered.*

УДК 733.34.37.39.05

**ИНВАРИАНТНОСТЬ ТЕОРЕТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОГО  
ДИСКРИМИНАТОРА ЗАДЕРЖКИ К НАПРАВЛЕНИЮ СМЕНЫ СИМВОЛОВ  
КОДА СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ**

**А. С. СЕЛИВЕРСТОВ**  
(ОАО «ГНИНГИ»)

*В статье приводится вывод формулы для оценивания задержки кода, обеспечивающей инвариантность теоретически оптимального дискриминатора задержки к направлению смены символа кода.*

Одним из важнейших направлений повышения эффективности навигационно-гидрографического обеспечения действий сил флота в экстремальных ситуациях является поиск альтернативы спутниковой навигационной системе (СНС) ГЛОНАСС, сопоставимого с ней по своим тактико-техническим характеристикам. В настоящее время такой альтернативой может быть только использование СНС GPS. Для его реализации в условиях введения США селективного доступа дискриминатор задержки в приемниках СНС должен обладать как минимум двумя функциями:

- осуществлять выделение огибающей входного сигнала, которая формирует границы смены символов кода (фронты дальномерных импульсов);
- быть инвариантным к направлению смены символа кода.

Подобными функциями обладает теоретически оптимальный дискриминатор задержки (ТОДЗ). Способ выделения синфазной огибающей входного сигнала с использованием ТОДЗ подробно изложен в докладах [1, 2].

Для определения инвариантности к направлению смены символов кода псевдослучайной последовательности (ПСП) в указанных материалах рассматривались два способа его программной реализации ТОДЗ.

Один из способов предполагает линейную интерполяцию отсчетов огибающей ( $I_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}}, I_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}$ ) на момент прогнозируемой границы смены символов (ПГСС)  $t_{\text{ПГСС}}$  и оценку отклонений  $\delta t$  от середины интервала ( $t_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}, t_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}}$ ) с последующим уточнением с помощью параболической и кубической интерполяции [2]:

$$\delta\tau_{\text{лин}} = \frac{I_{\text{лин}}^{\text{инт}} - \frac{1}{2}(I_i^{\text{прав}} + I_i^{\text{лев}})}{I_i^{\text{лев}} - I_i^{\text{прав}}} \Delta t, \quad (1)$$

$$\delta\tau_{\text{параб}} = \frac{I_{\text{параб}}^{\text{инт}} - I_{\text{лин}}^{\text{инт}}}{I_i^{\text{лев}} - I_i^{\text{прав}}} \Delta t, \quad (2)$$

$$\delta\tau_{\text{куб}} = \frac{I_{\text{куб}}^{\text{инт}} - I_{\text{лин}}^{\text{инт}}}{I_i^{\text{лев}} - I_i^{\text{прав}}} \Delta t, \quad (3)$$

где  $\delta\tau_{\text{лин}}$  – отстояние истинной границы смены символа кода от середины интервала  $\Delta t$ ;

$\delta\tau_{\text{параб}}$  и  $\delta\tau_{\text{куб}}$  – отклонение оценки момента времени истинной границы смены символа кода от такой же оценки, полученной линейной интерполяцией.

Данный способ автоматически придает ТОДЗ свойства инвариантности к направлению смены символов кода. Указанный факт объясняется наличием в знаменателе разности отсчетов огибающей, знак которой зависит от направления смены символов кода:

- $\Delta E > 0$  при смене символа с 1 на 0;
- $\Delta E < 0$  при смене символа с 0 на 1.

Другой способ связан с разложением в ряд Тейлора разрывной функции слева и справа от точки разрыва с известной величины ( $\pm 2a$ ) (рис. 1). При этом значение амплитуды ( $a$ ) непрерывно уточняется в процессе работы ТОДЗ усреднением модуля разности отсчетов огибающей ( $E_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}} - E_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}$ ), охватывающих ПГСС.

Абсцисса точки разрыва (истинного положения границы смены символа кода) получается вмещением отрезка длиной  $|2a|$  между отсчетами огибающей слева и справа ( $E_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}}, E_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}$ ). Полученная абсцисса принимается за текущую оценку истинного смещения смены символов кода.

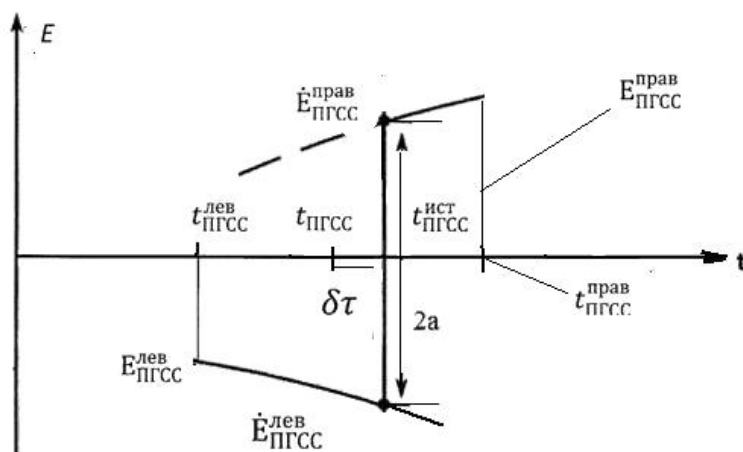


Рис. 1. Графическое построение программной реализации ТОДЗ

Отстояние истинной границы смены символа кода от прогнозируемой находится [2]:

$$\delta t = \frac{\Delta E + (\dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}} + \dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}) \frac{\Delta t}{2}}{\dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}} - \dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}}}, \quad (4)$$

где  $\Delta E = E_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}} - E_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}$  – разность амплитуд огибающей сигнала от ПГСС слева и справа;

$\Delta t = t_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}} - t_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}}$  – временной интервал между правой и левой границей ПГСС;

$\delta t$  – отстояние истинной границы смены символа кода от ПГСС;

$\dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}}, \dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}$  – скорость изменения отсчетов огибающей слева и справа от границы смены символов кода.

Данный подход реализует адекватную модель разрывной функции, поэтому, казалось бы, должен обеспечивать более точные оценки. Однако результаты обработки реальных измерений показали, что средняя квадратическая погрешность (СКП) задержки, полученная способом разложения в ряд Тейлора, хуже, чем при линейной интерполяции (рис. 2, 3).

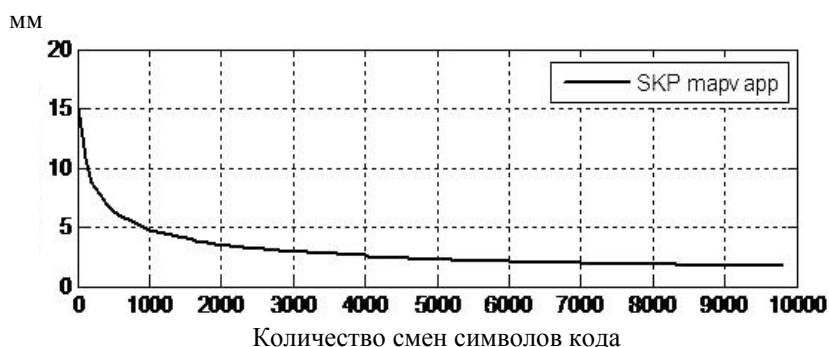


Рис. 2. СКП измерения псевдодалности (разложение в ряд Тейлора)

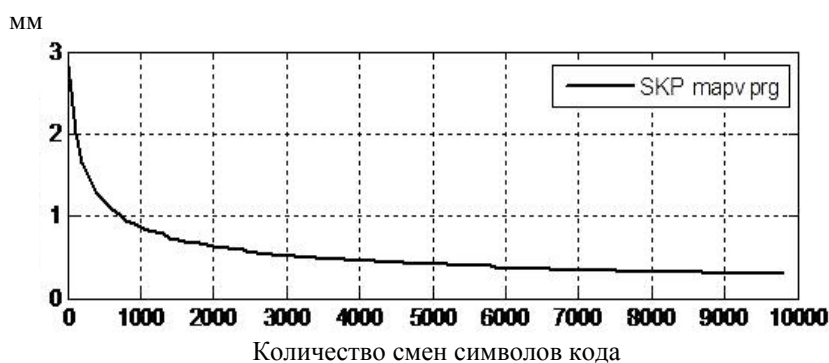


Рис. 3. СКП измерения псевдодалности (линейная интерполяция)

Это объясняется двумя причинами:

1. Производные  $i^{\text{лев}}$  и  $i^{\text{прав}}$  были получены сплайновой аппроксимацией  $I(t_i)$ .

Как известно, производные сплайна могут существенно отличаться от истинных скоростей, из-за сложности вычисления кривизны сплайна через аппроксимируемые отсчеты.

2. При реализации способа разложения в ряд Тейлора допущены погрешности в расчетных формулах для оценок задержки. В частности было предложено вычислять разность  $(\Delta E - 2a)$ , считая, что она определит знак смены символа кода. В действительности, так как разность отсчетов огибающей  $(\Delta E)$  сама по себе равна плюс  $2a$  при смене символа кода с «-» на «+» и минус  $2a$  при смене символа кода с «+» на «-», то искомая разность  $(\Delta E - 2a)$  будет равняться нулю при смене символа кода с «-» на «+» и минус  $4a$  – при смене символа кода с «+» на «-».

С целью устранения отмеченных недостатков, подтверждения теоретических выкладок и придания способу разложения в ряд Тейлора свойств инвариантности необходимо в программно-математический аппарат ввести знак смены символа кода:

$$\begin{aligned} \Delta E - \text{sign}[\Delta E]2a + (\dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}} + \dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}) \frac{\Delta t}{2} + (\dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}} - \dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}) \delta t + \\ + (\ddot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}} + \ddot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}) \frac{\Delta t^2}{4} + (\ddot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}} - \ddot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}) \frac{\delta t^2}{2} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\text{sign}[\Delta E]$  – знак величины скачка.

Отбросив два последних слагаемых в уравнении (5), получим уравнение:

$$\Delta E - \text{sign}[\Delta E]2a + (\dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}} + \dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}) \frac{\Delta t}{2} + (\dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}} - \dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}) \delta t = 0. \quad (6)$$

Решая линейное уравнение (6), находим значение для  $\delta t_{\text{лин}}$ :

$$\delta t_{\text{лин}} = \frac{\Delta E - \text{sign}[\Delta E]2a + (\dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}} + \dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}}) \frac{\Delta t}{2}}{\dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{прав}} - \dot{E}_{\text{ПГСС}}^{\text{лев}}}. \quad (7)$$

Решением квадратного уравнения (5) можно уточнить решение линейного (6) и из двух действительных значений  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  выбирать то, которое ближе к решению линейного.

Теперь выражение (7) не только реализует адекватную модель разрывной функции  $I(t)$ , но и использует дополнительную информацию о величине скачка в точке разрыва.

Обработка реальных сигналов с учетом введенной поправки поставила все на свои места – СКП задержки, полученная способом разложения в ряд Тейлора, стала в несколько раз точнее, чем при линейной интерполяции (рис. 4, 5).





Рис. 4. СКП измерения псевдодальности (разложение в ряд Тейлора)

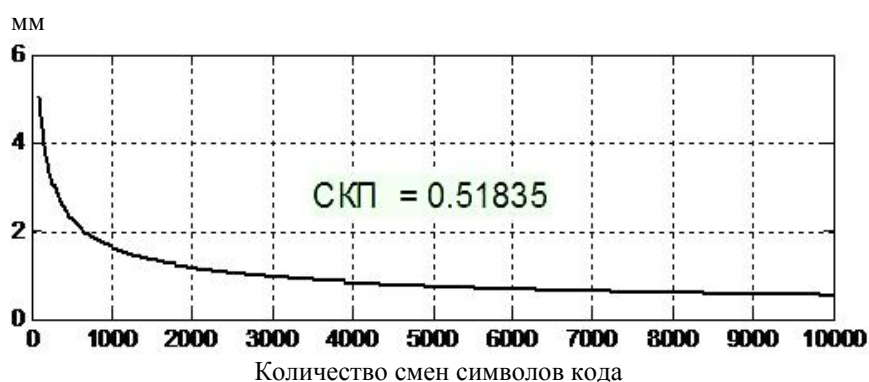


Рис. 5. СКП измерения псевдодальности (линейная интерполяция)

Для проверки влияния отраженных лучей на работу ТОДЗ с введенной поправкой в программу обработки были введены значения параметров многолучевости: частоты, фазы и амплитуды отраженного сигнала, размерность которых аналогична размерности параметров прямого сигнала (см. таблицу).

Параметр	Размерность	Значение
Число смен символа кода	–	10000
Частота отражённого сигнала	Гц	81920629
Фаза отражённого сигнала	град	0–360
Превышение амплитуды отражённого луча над амплитудой сигнала	–	1000

Полученные результаты представлены на рис. 6, 7.

Сравнивая графики (рис. 4, 5 и рис. 6, 7), можно убедиться, что отраженные лучи не оказывают влияния на ТОДЗ.

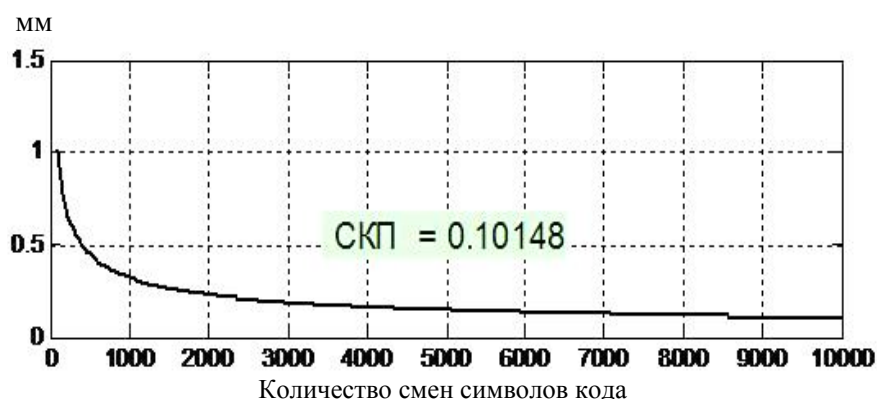


Рис. 6. СКП измерения псевдодальности (разложение в ряд Тейлора)

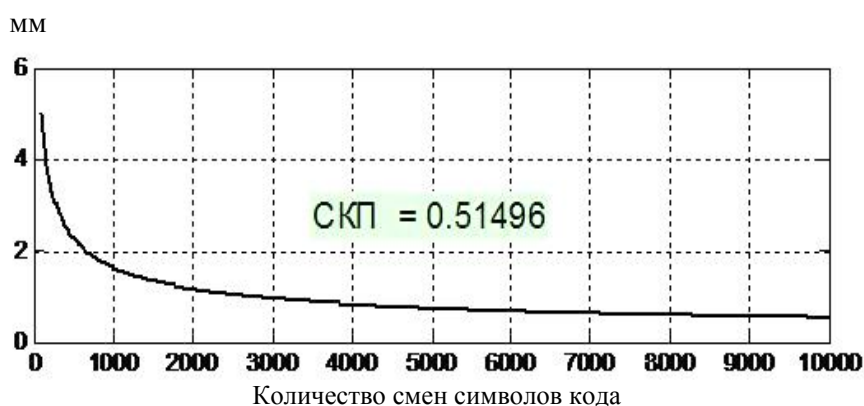


Рис. 7. СКП измерения псевдодальности (линейная интерполяция)

Все, что относится к разности  $\Delta E = I_{ПГСС}^{лев} - I_{ПГСС}^{прав}$ , справедливо и для их математического ожидания (МО), поскольку шумы на входе могут исказить знак смены символов кода. Однако в силу линейности операций формирования огибающей (синфазной квадратуры) входного сигнала эти искажения подчиняются нормальному закону распределения входных шумов и хорошо усредняются по множеству оценок  $\delta t$ .

С возникновением задачи обеспечения инвариантности ТОДЗ к знаку направления смены символов кода стало интересно провести аналогию с традиционным дискриминатором (ТД), который инвариантен к этим направлениям по определению. Для снижения уровня влияния ошибок многолучевости в ТД часто применяют узкостробовые корреляторы. Однако крутизна их дискриминационной характеристики (ДХ) остается той же (равной единице), что и у исходного дискриминатора с шириной строба кода равной  $(\pm \frac{\tau_{чипа}}{2})$ . Причем, если ширина

строба изменена даже до  $\frac{\tau_{чипа}}{10}$ , то во столько же раз сужается рабочая зона этого

дискриминатора, и даже естественные шумы будут с очень большой вероятностью срывать синхронизацию системы слежения за задержкой (ССЗ).

Предлагаемый ТОДЗ (его программная реализация с дискретными отсчетами входного сигнала) можно назвать сверхзкостробовым. При этом крутизна его ДХ значительно больше крутизны ДХ традиционного дискриминатора при отсутствии ограничений рабочей зоны и запаса устойчивости такой же, как и в ТД.

#### **Выводы**

1) Получена уточненная формула оценки задержки кода псевдослучайной последовательности, обеспечивающая инвариантность теоретически оптимального дискриминатора задержки к направлению смены символа кода при реализации подхода разложения в ряд Тейлора.

2) Способ разложения в ряд Тейлора по своим точностным характеристикам превосходит способ линейной интерполяции.

3) Полное подавление ошибок многолучевости при уточненной формуле сохраняется.

4) Инвариантность теоретически оптимального дискриминатора задержки к смене символов кода позволяет использовать GPS даже при введении США селективного доступа.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Дубинко Ю. С., Селиверстов А. С. Оптимизация системы слежения за задержкой в аппаратуре потребителей спутниковых навигационных систем – Тр. 16<sup>ой</sup> международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – 2010. – Воронеж. – С. 1973–1982.
2. Дубинко Ю. С., Селиверстов А. С. Возможности повышения точностных характеристик при определении места по спутниковым навигационным системам // Тр. VII научно-технической конференции «Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности». – 2011. – СПб. – С. 295–302.

#### ***INVARIANCE OF THE THEORETICALLY OPTIMUM DELAY DISCRIMINATOR TO DIRECTION OF THE RANGING CODE SYMBOL CHANGE OF NAVIGATION SATELLITES SIGNALS***

**A. S. Seliverstov** («GNINGI» OJSC)

*Derivation of the formula intended to evaluate the code delay providing the invariance of theoretically optimum delay discriminator to direction of the code symbol change is presented.*

УДК 629.7

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УТОЧНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ  
НАВИГАЦИОННОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ  
ВЫСОТЫ ЕГО ПОЛЁТА**

**А. Д. ГОЛЯКОВ**

(ВКА имени А. Ф. Можайского)

*Для совершенствования систем спутниковой навигации, используемой при решении задач навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности проведен анализ возможности определения параметров движения центра масс навигационного космического аппарата бортовым высотомером.*

*В статье с использованием теории статистического оценивания точности определения параметров движения центра масс космических средств приведен перечень векторов, которые могут определяться по измерениям высоты полета, и ковариационные матрицы соответствующих погрешностей навигации.*

При решении задач навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности [1] важную роль играют исследования в области совершенствования спутниковой навигации. Одним из направлений этих исследований является поиск эффективных способов и средств получения дополнительной информации, способной обеспечить заданную продолжительность автономного функционирования навигационного космического аппарата (НКА) при возникновении отказов в наземном комплексе управления глобальной спутниковой радионавигационной системой или в каналах передачи данных.

В качестве дополнительной информации для навигации НКА могут выступать результаты измерений высоты его полета над водной поверхностью. Измерения высоты полета НКА, выполняемые бортовыми приборами, сопровождаются неизбежными погрешностями, которые носят случайный характер. Поэтому для проведения анализа возможности уточнения параметров движения НКА по измерениям высоты его полёта воспользуемся стохастическим методом начального оценивания, который изложен в статье [2].

При этом будем полагать, что НКА совершает полёт по околокруговой орбите. Параметры движения центра масс НКА в прямоугольной экваториальной геоцентрической системе отсчёта  $XYZ$  [3] в некоторый момент времени  $t_0$  на опорной орбите определяются вектором [3]:

$$\bar{Q}_o(t_0) = [X_o(t_0) \ Y_o(t_0) \ \dot{X}_o(t_0) \ \dot{Y}_o(t_0) \ Z_o(t_0) \ \dot{Z}_o(t_0)]^T = [r_o \ 0 \ 0 \ V_o \ 0 \ 0]^T, \quad (1)$$

где модуль скорости  $V_o$  полета НКА связан с радиусом его орбиты  $r_o$  известным соотношением [3]

$$V_o = \lambda_o r_o = \sqrt{\frac{\mu}{r_o}},$$

где  $\lambda_o$  – угловая орбитальная скорость движения НКА;  
 $\mu$  – гравитационный параметр Земли.

Для определения координат НКА в течение одного витка бортовыми средствами измеряется высота полёта ( $H$ ). Измерения проводятся с постоянной частотой. Количество измерений равно  $N$ . Погрешность измерений характеризуется постоянной дисперсией  $\sigma_H^2$ . Систематические погрешности измерений отсутствуют.

Согласно стохастическому методу начального оценивания [2] для проведения анализа результатов измерений высоты полета НКА требуется определить ковариационную матрицу погрешностей навигации КА.

$$K_H(\bar{Q}(t_0), t) = [W_H^T(t, t_0) \cdot K_H^{-1} \cdot W_H(t, t_0)]^{-1}, \quad (2)$$

где  $W_H(t, t_0)$  – матрица (вектор-строка размера  $1 \times 6$ ), элементами которой являются частные производные от высоты полета НКА по искомым параметрам его движения.

Как известно [3], матрицу  $W_H(t, t_0)$  можно получить из выражения

$$W_H(t, t_0) = A_H(t) \cdot B'(t, t_0); \quad (3)$$

где  $A_H(t)$  – навигационная матрица (вектор-строка размера  $1 \times 3$ ):

$$A_H(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial H(t)}{\partial x(t)} & \frac{\partial H(t)}{\partial y(t)} & \frac{\partial H(t)}{\partial z(t)} \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ 0]; \quad (4)$$

$B'(t, t_0)$  – блок матрицы баллистических производных размера  $3 \times 6$ :

$$B'(t, t_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x(t)}{\partial x(t_0)} & \frac{\partial x(t)}{\partial y(t_0)} & \frac{\partial x(t)}{\partial \dot{x}(t_0)} & \frac{\partial x(t)}{\partial \dot{y}(t_0)} & \frac{\partial x(t)}{\partial z(t_0)} & \frac{\partial x(t)}{\partial \dot{z}(t_0)} \\ \frac{\partial y(t)}{\partial x(t_0)} & \frac{\partial y(t)}{\partial y(t_0)} & \frac{\partial y(t)}{\partial \dot{x}(t_0)} & \frac{\partial y(t)}{\partial \dot{y}(t_0)} & \frac{\partial y(t)}{\partial z(t_0)} & \frac{\partial y(t)}{\partial \dot{z}(t_0)} \\ \frac{\partial z(t)}{\partial x(t_0)} & \frac{\partial z(t)}{\partial y(t_0)} & \frac{\partial z(t)}{\partial \dot{x}(t_0)} & \frac{\partial z(t)}{\partial \dot{y}(t_0)} & \frac{\partial z(t)}{\partial z(t_0)} & \frac{\partial z(t)}{\partial \dot{z}(t_0)} \end{bmatrix}.$$

С учётом матрицы баллистических производных, приведённой в монографии [4], получаем:

$$B'(t, t_0) = \begin{bmatrix} 2 - \cos \varphi & \sin \varphi & \frac{\sin \varphi}{\lambda_o} & \frac{2(1 - \cos \varphi)}{\lambda_o} & 0 & 0 \\ 2 \sin \varphi - 3\varphi & 2 \cos \varphi - 1 & \frac{2(\cos \varphi - 1)}{\lambda_o} & \frac{4 \sin \varphi - 3\varphi}{\lambda_o} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \varphi & \frac{\sin \varphi}{\lambda_o} \end{bmatrix} \quad (5)$$

После подстановки матриц (4) и (5) в выражение (3) находим:

$$W_H(t, t_0) = \begin{bmatrix} 2 - \cos \varphi & \sin \varphi & \frac{\sin \varphi}{\lambda_o} & \frac{2(1 - \cos \varphi)}{\lambda_o} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Заметим, что частные производные от высоты полёта по параметрам движения относительно плоскости орбиты (боковым параметрам) НКА (функции чувствительности высоты полёта от боковых параметров движения) равны нулю. Поскольку боковые параметры  $Z(t_0)$  и  $\dot{Z}(t_0)$  движения НКА оценить по измерениям высоты полёта не удаётся, ограничимся оцениванием точности параметров движения НКА в плоскости его орбиты, т. е. вектора

$$\bar{Q}_1(t_0) = [X(t_0) \ Y(t_0) \ \dot{X}(t_0) \ \dot{Y}(t_0)]^T \quad (7)$$

В этом случае матрица частных производных от высоты полета НКА по искомым параметрам его движения принимает вид:

$$W'_H(t, t_0) = \begin{bmatrix} 2 - \cos \varphi & \sin \varphi & \frac{\sin \varphi}{\lambda_o} & \frac{2(1 - \cos \varphi)}{\lambda_o} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Используя матрицу (8) и стохастический метод начального оценивания [2], находим обратную ковариационную матрицу погрешностей навигации вектора (7)

$$C_H(\bar{Q}_1(t_0), 2\pi) = \frac{N}{2\sigma_H^2} \begin{bmatrix} 9 & 0 & 0 & \frac{10}{\lambda_o} \\ 0 & 1 & \frac{1}{\lambda_o} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_o} & \frac{1}{\lambda_o^2} & 0 \\ \frac{10}{\lambda_o} & 0 & 0 & \frac{12}{\lambda_o^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Заметим, что второй и третий столбцы (а также вторая и третья строка) матрицы (9) связаны между собой линейной зависимостью. Поэтому эта матрица является особенной. Действительно, найдём определитель матрицы (9)

$$|C_H(\bar{Q}_1(t_0), 2\pi)| = 9 \cdot \begin{vmatrix} 1 & \frac{1}{\lambda_o} & 0 \\ \frac{1}{\lambda_o} & \frac{1}{\lambda_o^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12}{\lambda_o^2} \end{vmatrix} - \frac{10}{\lambda_o} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 & \frac{1}{\lambda_o} \\ 0 & \frac{1}{\lambda_o} & \frac{1}{\lambda_o^2} \\ \frac{1}{\lambda_o} & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0.$$

Поскольку определитель матрицы (9) равен нулю, вектор (7) по результатам измерений высоты полёта НКА не поддаётся оцениванию.

В связи с этим рассмотрим трёхмерный вектор параметров движения в плоскости орбиты НКА, например, вектор

$$\bar{Q}'_1(t_0) = [X(t_0) \ Y(t_0) \ \dot{X}(t_0)]^T. \quad (10)$$

Обратная ковариационная матрица погрешностей навигации вектора (10) принимает вид

$$C_H(\bar{Q}'_1(t_0), 2\pi) = \frac{N}{2\sigma_H^2} \begin{bmatrix} 9 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{\lambda_o} \\ 0 & \frac{1}{\lambda_o} & \frac{1}{\lambda_o^2} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Очевидно, что определитель матрицы (11) равен нулю. Не трудно убедиться в том, что по измерениям высоты полёта трёхмерные векторы, содержащие трансверсальную координату и радиальную составляющую вектора скорости, т. е. векторы  $\bar{Q}'_1(t_0) = [X(t_0) \ Y(t_0) \ \dot{X}(t_0)]^T$  и  $\bar{Q}'_2(t_0) = [Y(t_0) \ \dot{X}(t_0) \ \dot{Y}(t_0)]^T$ , а также двумерный вектор  $\bar{Q}'_3(t_0) = [Y(t_0) \ \dot{X}(t_0)]^T$  не поддаются оцениванию.

При этом принципиальная возможность уточнения существует у двух трёхмерных векторов  $\bar{Q}'_3(t_0) = [X(t_0) \ Y(t_0) \ \dot{Y}(t_0)]^T$  и  $\bar{Q}'_4(t_0) = [X(t_0) \ \dot{X}(t_0) \ \dot{Y}(t_0)]^T$  и трех двумерных векторов  $\bar{Q}''_2(t_0) = [X(t_0) \ Y(t_0)]^T$ ,  $\bar{Q}''_3(t_0) = [X(t_0) \ \dot{Y}(t_0)]^T$  и  $\bar{Q}''_4(t_0) = [\dot{X}(t_0) \ \dot{Y}(t_0)]^T$ .

С целью проверки этого положения найдём ковариационную матрицу трёхмерного вектора параметров движения НКА в плоскости орбиты, в котором отсутствует радиальная составляющая скорости  $\dot{X}(t_0)$ , т. е. вектора

$$\bar{Q}'_3(t_0) = [X(t_0) \ Y(t_0) \ \dot{Y}(t_0)]^T.$$

Путём удаления из матрицы (9) третьего столбца и третьей строки получаем

$$C_H(\bar{Q}'_3(t_0), 2\pi) = \frac{N}{2\sigma_H^2} \begin{bmatrix} 9 & 0 & \frac{10}{\lambda_o} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{10}{\lambda_o} & 0 & \frac{12}{\lambda_o^2} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Результатом обращения матрицы (12) является ковариационная матрица

$$K_H(\bar{Q}'_3(t_0), 2\pi) = \frac{\sigma_H^2}{4N} \begin{bmatrix} 12 & 0 & -10\lambda_o \\ 0 & 8 & 0 \\ -10\lambda_o & 0 & 9\lambda_o^2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Анализ ковариационной матрицы (13) показывает, что, во-первых, дисперсия погрешности уточнения радиальной координаты превышает дисперсию погрешности трансверсальной координаты. Во-вторых, погрешности уточнения координат  $X(t_0)$  и  $Y(t_0)$  не зависят от радиуса орбиты НКА. В-третьих, корреляционная зависимость существует только между радиальной координатой и трансверсальной составляющей скорости. В-четвёртых, дисперсия погрешности определения трансверсальной координаты уменьшается с ростом радиуса орбиты.

Проведя аналогичные преобразования, можно получить ковариационную матрицу погрешностей определения трехмерного вектора  $\bar{Q}'_4(t_0) = [X(t_0) \ \dot{X}(t_0) \ \dot{Y}(t_0)]^T$ :

$$K_H(\bar{Q}'_4(t_0), 2\pi) = \frac{\sigma_H^2}{4N} \begin{bmatrix} 12 & 0 & -10\lambda_o \\ 0 & 8\lambda_o^2 & 0 \\ -10\lambda_o & 0 & 9\lambda_o^2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Найдём ковариационную матрицу вектора координат НКА в плоскости орбиты, т. е. вектора  $\bar{Q}''_2(t_0) = [X(t_0) \ Y(t_0)]^T$ .

Можно показать, что после удаления третьего и четвёртого столбцов, а также третьей и четвёртой строк в матрице (9), получаем матрицу

$$C_H(\bar{Q}''_2(t_0), 2\pi) = \frac{N}{2\sigma_H^2} \begin{bmatrix} 9 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$



Для определения ковариационной матрицы погрешностей вектора  $\bar{Q}_2''(t_0)$  обращаем матрицу (15). В результате имеем:

$$K_H(\bar{Q}_2''(t_0), 2\pi) = \frac{2\sigma_H^2}{N} \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2(2\pi) & 0 \\ 0 & \sigma_Y^2(2\pi) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Анализ ковариационной матрицы (16) показывает, что по измерениям высоты полёта могут одновременно уточняться радиальная и трансверсальная координаты НКА. При этом средняя квадратическая погрешность радиальной координаты в три раза меньше средней квадратической погрешности трансверсальной координаты:

$$\frac{\sigma_X(\bar{Q}_2''(t_0), 2\pi)}{\sigma_Y(\bar{Q}_2''(t_0), 2\pi)} = \frac{1}{3}$$

Предположим, что необходимо найти ковариационную матрицу вектора погрешностей, содержащего радиальную координату и трансверсальную составляющую скорости, т. е. вектора  $\bar{Q}_3''(t_0) = [X(t_0) \dot{Y}(t_0)]^T$ .

После удаления второго и третьего столбцов, а также второй и третьей строк в матрице (9) получаем

$$C_H(\bar{Q}_3''(t_0), 2\pi) = \frac{N}{2\sigma_H^2} \begin{bmatrix} 9 & \frac{10}{\lambda_o} \\ \frac{10}{\lambda_o} & \frac{12}{\lambda_o^2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

После обращения матрицы (17) находим искомую ковариационную матрицу:

$$K_H(\bar{Q}_3''(t_0), 2\pi) = \frac{\sigma_H^2}{4N} \begin{bmatrix} 12 & -10\lambda_o \\ -10\lambda_o & 9\lambda_o^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2(2\pi) & \sigma_{XY}(2\pi) \\ \sigma_{XY}(2\pi) & \sigma_Y^2(2\pi) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где  $\sigma_{XY}(2\pi)$  – ковариация случайных погрешностей оценивания вектора  $\bar{Q}_3''(t_0)$ .

Сравнительный анализ матриц (16) и (18) позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, в матрице (18) появились ковариации, которые имеют отрицательные значения. Это свидетельствует о наличии обратной корреляционной зависимости между составляющими  $X(t_0)$  и  $\dot{Y}(t_0)$  вектора  $\bar{Q}_3''(t_0)$ . Коэффициент корреляции

$$\rho_{XY}(2\pi) = -\frac{5\lambda_o}{3\sqrt{3}} \approx -\lambda_o$$

связан линейной зависимостью с угловой скоростью вращения НКА по опорной орбите, т. е. с ростом радиуса орбиты НКА коэффициент корреляции между составляющими  $X(t_0)$  и  $\dot{Y}(t_0)$  уменьшается.

Во-вторых, дисперсия погрешности определения координаты  $X(t_0)$  при оценивании вектора  $\bar{Q}_3''(t_0) = [X(t_0) \dot{Y}(t_0)]^T$  на порядок превышает соответствующую дисперсию при оценивании вектора  $\bar{Q}_2''(t_0) = [X(t_0) Y(t_0)]^T$ .

Легко убедиться в том, что ковариационная матрица вектора  $\bar{Q}_4''(t_0) = [\dot{X}(t_0) \dot{Y}(t_0)]^T$  имеет вид

$$K_H(\bar{Q}_4''(t_0), 2\pi) = \frac{2\sigma_H^2}{N} \cdot \lambda_o \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{\dot{X}}^2(2\pi) & 0 \\ 0 & \sigma_{\dot{Y}}^2(2\pi) \end{bmatrix} \quad (19)$$

### **Выводы и предложения**

Для решения ряда задач, связанных с выбором облика и характеристик системы космической навигации, таких как, например, определение состава средств измерений навигационных параметров, обоснование требований к показателям их точности и оперативности, необходим комплекс исследований, посвященных детальному изучению каждого измеряемого в полете навигационного параметра. При этом на этапе первичного анализа широкое применение получили способы аналитического оценивания точности навигации. Одним из таких способов является способ, разработанный с помощью теории стохастического начального оценивания точности навигации космических средств, который учитывает неизбежные случайные погрешности навигационных измерений.

Полученные аналитическим путем ковариационные матрицы (13), (14), (16), (18) и (19) показывают, что погрешности определения координат НКА зависят как от количества и качества измерений высоты полёта НКА, так и от состава уточняемых параметров. При этом существуют такие составы параметров оценивания, в которых средние квадратические погрешности имеют наименьшее значение. В частности наиболее предпочтительным (в смысле точности навигации) оцениванием радиальной координаты НКА является состав параметров, который входит в вектор координат, характеризующий положение НКА в плоскости его орбиты.

В связи с отсутствием принципиальной возможности определения всех параметров движения НКА по измерениям высоты полёта в системах автономной навигации этот первичный навигационный параметр применяется с другими первичными навигационными параметрами, например, с угловыми астрономическими измерениями [4].

Для повышения уровня достоверности полученных результатов дальнейшие аналитические исследования целесообразно проводить с учетом систематических погрешностей измерений, а также погрешностей, связанных с условиями распространения луча высотомера в атмосфере Земли.

---

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Алексеев С. П. Технологические инновации как основа современной технической политики в области навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности // Навигация и гидрография.– 2009. – №28. – С. 9–13.
2. Голяков А. Д. Методы аналитического оценивания точности системы автономной навигации космических аппаратов // Навигация и гидрография.– 2010. – №30. – С. 47–58.
3. Голяков А. Д., Лукашевский А. А., Смирнов В. В. Системы навигации космических аппаратов. – СПб: МО РФ, 2003. – 267 с.
4. Голяков А. Д. Введение в теорию взаимной астронавигации ИСЗ. – СПб.: ВИКА им. А. Ф. Можайского, 1992. – 142 с.

***ANALYSIS OF THE POSSIBILITY TO ADJUST THE PARAMETERS OF NAVIGATION SPACECRAFT MOVEMENT USING THE MEASUREMENT OF THE HEIGHT OF ITS FLIGHT***

**A. D. Golyakov** (A. F. Mozhaiysky Military-Space Academy)

*To improve the satellite navigation systems used for solving the tasks of navigation-hydrographical support for the maritime activities, the analysis of the possibility to determine the parameters of motion of the center of mass of the navigation spacecraft by the flight altimeter is carried out.*

*Using the theory of statistical estimation of the accuracy of the determination of the parameters of motion of the center of mass of the space assets, the vectors that can be determined by measurements of the height of flight, and the variance-covariance matrix of the corresponding navigation uncertainties are listed.*

---

# ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

---

УДК 528.92

## **СПОСОБ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДАННЫХ О ГЛУБИНАХ ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА ДНА**

**Ю. Н. ЖУКОВ**  
(ОАО «ГНИНГИ»)

*В статье вводится и обосновывается применение трехмерной триангуляции Делоне для оценки характеристик качества массива глубин для восстановления поверхности рельефа дна. Приводится пример применения трехмерной триангуляции с оценкой характеристик качества исходных данных.*

Построение формы рельефа дна моря с помощью ЭВМ осуществляется по неупорядоченным наборам точечных измерений глубин. При этом важным моментом является возможность оценки качества данных о глубинах. Здесь под качеством данных о глубинах понимается набор количественных характеристик, описывающих совокупность точечных глубин с различных сторон, например, достаточность плотности точек глубин, вертикальная погрешность, максимальное линейное разрешение и т. д. Ниже излагается способ, позволяющий сформулировать и вычислить набор характеристик, определяющих качество данных о глубинах для построения формы рельефа дна. Способ основан на применении трехмерной триангуляции Делоне к массиву данных о глубинах.

В геоинформационных системах для построения формы рельефа дна в качестве базового алгоритма используется двумерный алгоритм триангуляции Делоне, который позволяет определить жесткую систему связей между неупорядоченными пространственными точками. Однако двумерная триангуляция не позволяет оценить характеристики качества восстановления. Дело в том, что для двумерной триангуляции используются только точки, соответствующие пространственным координатам измеренных глубин. Третья координата – глубина в двумерном алгоритме триангуляции не учитывается. Это обстоятельство приводит к возможному искажению картины структурных линий рельефа, например, вместо ложбины определяется гребень и наоборот. Кроме того, процедура двумерной триангуляции использует весь набор координат точек с любыми расстояниями между ними. Это приводит к неконтролируемой погрешности при восстановлении рельефа, так как не учитывается распределение точек измерения глубин по пространству.

Решение проблем, связанных с применением двумерной триангуляции, будем искать на пути учета всех трех координат точек измерения глубин, а именно – двух пространственных координат и собственно величины глубины. Воспользуемся

трехмерной триангуляцией Делоне. Все математические свойства двумерной триангуляции Делоне сохраняются и для трехмерного её варианта. Трёхмерная триангуляция может применяться без ограничений на размер акватории, так как она задана в трёхмерном пространстве, в том числе для всего земного шара. Более того, результаты трёхмерной триангуляции позволяют получить оценку допустимости заданного набора точек глубин для восстановления рельефа с заданной погрешностью.

Основным достоинством трёхмерной интерполяции является возможность построения «верхней» и «нижней» границ (триангулированных поверхностей) местоположения в пространстве искомой истинной поверхности рельефа. Мотивация применения трёхмерной триангуляции основана на желании использовать все «возможные» варианты связей между близкими точками.

Формальное основание использования трёхмерной триангуляции Делоне для оценки качества восстановления рельефа базируется на так называемом методе « $\alpha$ -формы». Этот метод позволяет выявить форму поверхности по неупорядоченному «облаку» точек [1]. Формулировка задачи следующая. Дано множество точек  $S \subset \mathbf{R}^d$  в трёхмерном  $d=3$  (или двумерном  $d=2$ ) числовом  $\mathbf{R}$  пространстве и требуется получить представление о форме возможной поверхности (линии контура), на которой эти точки располагаются. Расплывчатая постановка задачи дает возможность искать различные варианты ее решения. Кратко изложим только неформальную мотивацию, заложенную в методе  $\alpha$ -форма, так как математическая аргументация этого метода базируется на понятиях алгебраической топологии.

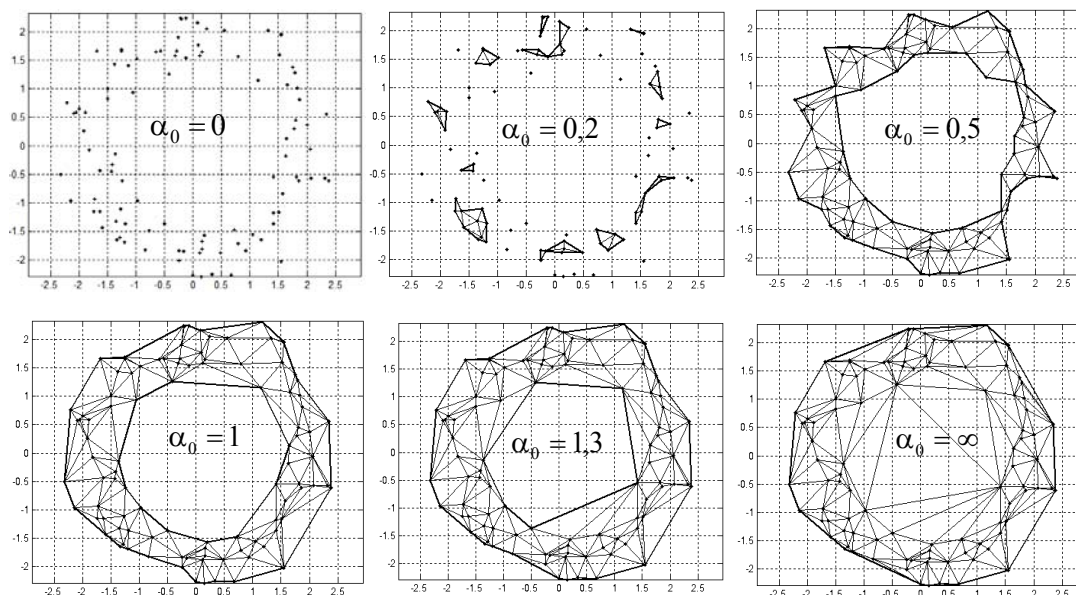
Дадим задаче следующую физическую интерпретацию. Точки ( $S$ ) представляют собой камни, вмороженные в огромную массу неподвижного снега ( $\mathbf{R}^d$ ). Используя «огромную ложку» в виде сферы фиксированного радиуса ( $\alpha$ ) будем выбирать сверху снежную массу так, чтобы камни оголились, но остались неподвижны. В итоге получим некоторую форму поверхности (контур), ограниченную точками, дугами и шаровыми секторами. Форма поверхности (контур) будет определяться выбранной величиной радиуса  $\alpha$ . Не усложняя рассмотрение деталями, можно считать, что если значение  $\alpha$  меньше половины минимального расстояния между двумя точками ( $\alpha \rightarrow 0$ ), то всю снежную массу можно будет удалить (ложкой можно проникнуть между любыми камнями), останутся только множество изолированных камней, то есть форма вырождается в точечное множество. Если же значение  $\alpha$  больше половины максимального расстояния ( $\alpha \rightarrow \infty$ ) между точками (между любыми двумя камнями ложка не пройдет), то мы получим односвязную поверхность с формой близкой к форме выпуклой оболочки для  $S$ .

На практике реализация этой схемы использует триангуляцию Делоне. В качестве «сферической ложки» используют радиусы описанных окружностей вокруг элементов триангуляции. Из структуры общей триангуляции удаляют элементы (треугольники для трёхмерного случая и ребра треугольников для двумерного) с большими значениями радиусов, оставляя только те грани триангуляции, радиус описанной сферы (окружности) которых меньше некоторого значения  $\alpha_0$ . Иллюстрация представлена на рис. 1.

Для трехмерных точек аналогичное представление  $\alpha$ -формы на плоскости изобразить удовлетворительным образом затруднительно. Значительно проще представить, что точки на рис. 1 являются отметками высот рельефа Земли на ее сечении плоскостью по некоторому меридиану. Тогда «жирные» линии будут отображать две  $\alpha$ -формы поверхности рельефа при приближении к нему сверху (по направлению к центру Земли) и снизу (от центра Земли).

Для целей оценки достаточности данных массива глубин адаптируем метод  $\alpha$ -форм пополнением его двумя параметрами для оптимизации процесса трехмерной триангуляции.

Элементарным геометрическим объектом, образующим триангуляционную сеть на множестве точек в трехмерном пространстве, является четырехгранник (треугольная пирамида). Множество четырехгранников триангуляции точек глубин будут иметь различные длины сторон, и их можно упорядочить по степени правильности. Наиболее правильные – тетраэдры являются четырехгранниками с равными длинами сторон. Чем больше неравенство длин сторон в четырехграннике, тем более он неправильный. Степень неправильности можно оценить количественно по величине радиуса  $\alpha$  описанной вокруг четырехгранника сферы – чем больше  $\alpha$ , тем менее правильный четырехгранник [2].



**Рис. 1. Иллюстрация  $\alpha$ -форм для ста случайных точек на плоскости вблизи окружности радиусом в две единицы. Значения  $\alpha_0$  даны в центре рисунков. Отрезками отображена двумерная триангуляция Делоне**

В нашей задаче важнейшее значение имеет «равномерный» учет всех трех координат точки измеренных глубин, в противном случае, как, например, при использовании двумерной триангуляции, информация, присутствующая в значениях какой-то координаты (каких-то координат) будет использована при построении поверхности рельефа в искаженном виде. Идеальным вариантом будет тот, при

котором все четырехгранники будут тетраэдрами, только в этом случае все три координаты имеют одинаковый вес в конечном результате. Это следует из теории оптимального триангулирования объемных тел [3]. Поэтому следует применять трехмерную триангуляцию, которая приводит к наиболее правильному множеству четырехгранников, то есть соответствующее им множество  $\{\alpha\}$  должно иметь как можно меньшие значения. В условиях фиксированности данных гидрографических наблюдений приблизиться к идеальной трехмерной триангуляции можно за счет изменения соотношения между масштабом «горизонтальных» координат и масштабом «вертикальных» – глубин. В действительности это соотношение между масштабами не определено. Перепады высот-глубин, выраженные в единицах масштаба горизонтальных координат, пренебрежимо малы по сравнению с линейными расстояниями по поверхности Земли. Например, отношение разности высот между высотой Эвереста (8844 м) и глубиной Марианской впадины (11022 м) к длине экватора (40075696 м) равно 0,0005, что свидетельствует о том, что в принятых единицах измерения поверхность Земли представляет собой практически гладкую поверхность, что можно видеть, сравнив рис. 2б и 2в).

Введем параметр управления процессом трехмерной триангуляции – масштабный множитель  $M$  для значений глубин ( $M > 0$ ). Для различных значений  $M$  результаты трехмерной триангуляции будут давать различные наборы четырехгранников с различными  $\{\alpha\}_M$ . Действительно, умножение глубин на некоторое положительное число  $M$  будет изменять соотношение между горизонтальным и вертикальным масштабами, что будет приводить к другим результатам триангуляции с другим распределением радиусов описанных окружностей. Для согласования масштабов при трехмерной триангуляции выберем такой масштабный множитель  $M_0$  (оптимальный) для значений глубин, который приводит к наиболее малым значениям радиусов  $\{\alpha\}_{M_0}$ , то есть к наиболее правильным четырехгранникам. Это гарантирует, что вся измеренная информация (и координатная и высотная) наиболее полно среди всех возможных вариантов будет учтена при восстановлении рельефа дна. Значения  $M_0$  оптимально только для конкретного набора координат и глубин, для которых это значение получено. Очевидно, что измененные значения глубин используются только для вычисления связей триангуляции, соответствующих величине  $M$ . Для других вычислений и отображения применяются только исходные глубины, но с наложенными на них вычисленными связями триангуляции.

Рассмотрим множество четырехгранников  $\{\alpha\}_{M_0}$ . В совокупности они образуют сложную пространственную фигуру (симплициальный комплекс). Внешнюю поверхность этой фигуры образуют грани некоторых четырехгранников – треугольники. Совокупность этих треугольников образует выпуклую оболочку для трехмерного множества точек измеренных глубин. Аналогом может служить «жирная» линия при  $\alpha_0 = \infty$  на рис. 1. Можно считать, что истинная поверхность рельефа лежит между «верхними» и «нижними» треугольниками выпуклой оболочки, но это чрезвычайно грубое приближение к истинной поверхности рельефа и чрезвычайно плохая ее локализация. Более точное приближение и лучшую локализацию можно получить путем выбрасывания из множества  $\{\alpha\}_{M_0}$  тех

четырёхгранников, радиус  $\alpha$  которых больше чем  $\alpha'$  ( $0 < \alpha' < \infty$ ). Для больших значений  $\alpha'$  имеем выпуклую оболочку, а для малых значений  $\alpha'$  в пределе получаем множество изолированных точек (рис. 1), то есть при уменьшении значений  $\alpha'$  «верхняя» и «нижняя» поверхности триангуляции имеют тенденцию к сближению. Очевидно, что существует такой диапазон значений  $\alpha'$ , для которого поверхностные треугольники множества  $\{\alpha\}_{M_0}$  образуют связное множество.

Различия триангуляции в этом диапазоне значений определяются в основном только числом треугольников, образующих поверхность триангуляции. Очевидно, что необходимо иметь как можно большее число таких треугольников, так как это повышает детализацию описания поверхности рельефа. Поэтому среди всех значений  $\alpha'$  целесообразно выбрать в качестве оптимального значение  $\alpha_0$ , приводящее к максимальному числу поверхностных треугольников для  $\{\alpha\}_{M_0}$ . Тем самым мы определили оптимальное значение второго параметра управления процессом трехмерной триангуляции.

Здесь следует отметить еще одно положительное свойство трехмерной триангуляции для оценки достаточности данных – появление разрывов сплошности – туннелей (сквозные отверстия, либо внутренние) в сети четырехгранников. Наличие туннелей в сети триангуляции – следствие отсутствия четырехгранников для этой области в множестве  $\{\alpha \leq \alpha_0\}_{M_0}$ , то есть четырехгранники для этой области в  $\{\alpha\}_{M_0}$  имеют радиус описанной сферы больший чем  $\alpha_0$ . Это означает, что эти четырехгранники менее правильные, чем оставшиеся в  $\{\alpha \leq \alpha_0\}_{M_0}$ , то есть какая-то из трех координат не информативна для рассматриваемого набора точек глубин.

Сквозные туннели, подобные центральному отверстию тора, могут встречаться в двух случаях. Во-первых, когда изменения глубины происходят в большей степени, чем это характерно для остальных областей. Это свойство трехмерной триангуляции полностью соответствует математической теории интерполяции, где число точек интерполяции прямо пропорционально скорости изменения функции [4]. Во-вторых, когда изменения рельефа значительно меньше, чем это характерно в среднем для остальных областей. В том и другом случае локальные свойства изменчивости приводят к существенно неправильным четырехгранникам, чем в среднем, и эти четырехгранники не входят во множество  $\{\alpha \leq \alpha_0\}_{M_0}$ . Внутренние туннели, подобные форме тора, могут встречаться в местах с резкими поднятиями или впадинами в рельефе.

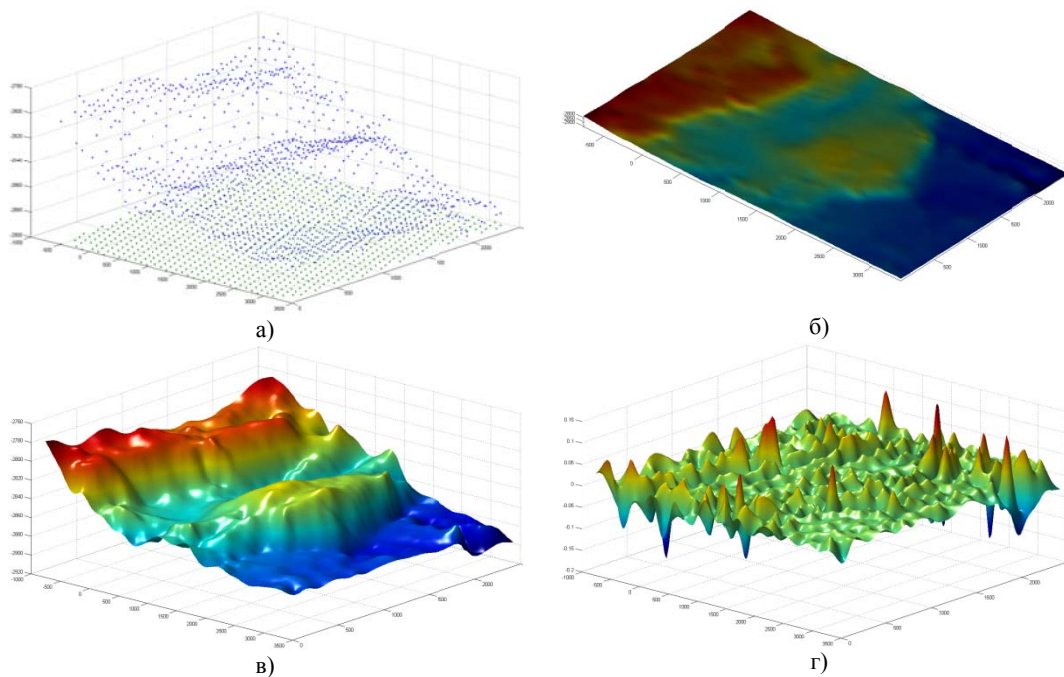
Кроме того, в процессе трехмерной триангуляции в сети четырехгранников могут для некоторых значений параметров появляться внутренние пустоты, подобные форме шара. Эти пустоты соответствуют участкам рельефа с резкими поднятиями или впадинами.

Связность трехмерной триангуляции, наличие в ней туннелей и пустот являются проявлением общих характеристик геометрических объемных фигур. Эти характеристики геометрических фигур изучает алгебраическая геометрия, где они называются числами Бетти [5]:  $\beta_0$  – число связных компонент,  $\beta_1$  – число туннелей внешних и внутренних как двумерных топологических объектов,  $\beta_2$  – число пустот и внутренних туннелей как трехмерных топологических объектов.



Окончательным результатом процесса триангуляции является множество четырехгранников с радиусами описывающих сфер меньшими или равными  $\alpha_0$ , т. е. множество  $\{\alpha \leq \alpha_0\}_{M_0}$ . Процедура построения «оптимальной» трехмерной триангуляции для данного набора точек глубин сводится к нахождению значения  $M_0$ , затем  $\alpha_0$  методом простого перебора тестируемых последовательностей  $\{M_i\}$  и  $\{\alpha'_j\}$ . В результате трехмерная триангуляция, соответствующая  $\{\alpha \leq \alpha_0\}_{M_0}$ , дает для конкретного заданного набора точек глубин максимально детальную трехмерную сеть, представляющую местонахождение истинной поверхности рельефа.

На рис. 2 представлены результаты промера, выполненного многолучевым эхолотом, и аппроксимация глубин гладкой функцией.



**Рис. 2. Результаты промера, выполненного многолучевым эхолотом, и аппроксимация глубин гладкой функцией.**

а – точки координат и глубин в метрах, расстояние между точками по оси  $x$  – 82,2 м, по оси  $y$  – 56,7 м, расстояние по диагонали между ближайшими точками – 99,6 м; б – аппроксимация глубин методом «тонкой пластины» (равные горизонтальный и вертикальный масштабы); в – аппроксимация глубин методом «тонкой пластины» (масштаб  $x:y:z=41,7:25:1$ ); г – график отклонения поверхности (б, в) от измеренных глубин (а), максимальное –  $|0,15|$  м

На рис. 3 представлены результаты применения рассмотренного метода трехмерной триангуляции к участку промера, представленному на рис. 2а. Полученные результаты обработки данных полностью соответствуют выводам, изложенным при рассмотрении изменчивости сети трехмерной триангуляции в зависимости от изменения  $M$  и  $\alpha'$ . Вычислено, что оптимальное значение  $M$  равно 0,7 (рис. 4), а оптимальное значение  $\alpha'$  равно 300 м (рис. 5). Для некоторых

значений этих параметров присутствуют туннели в поле трехмерной триангуляции, выраженные белыми ромбовидными областями (особенно много туннелей при  $M=2$  и  $\alpha'=80$  м). Заметим, что триангуляции в левых двух колонках образуют все возможные комбинации связей между ближайшими точками, то есть «верхние» и «нижние» точки поверхности триангуляции совпадают (рис. 6).

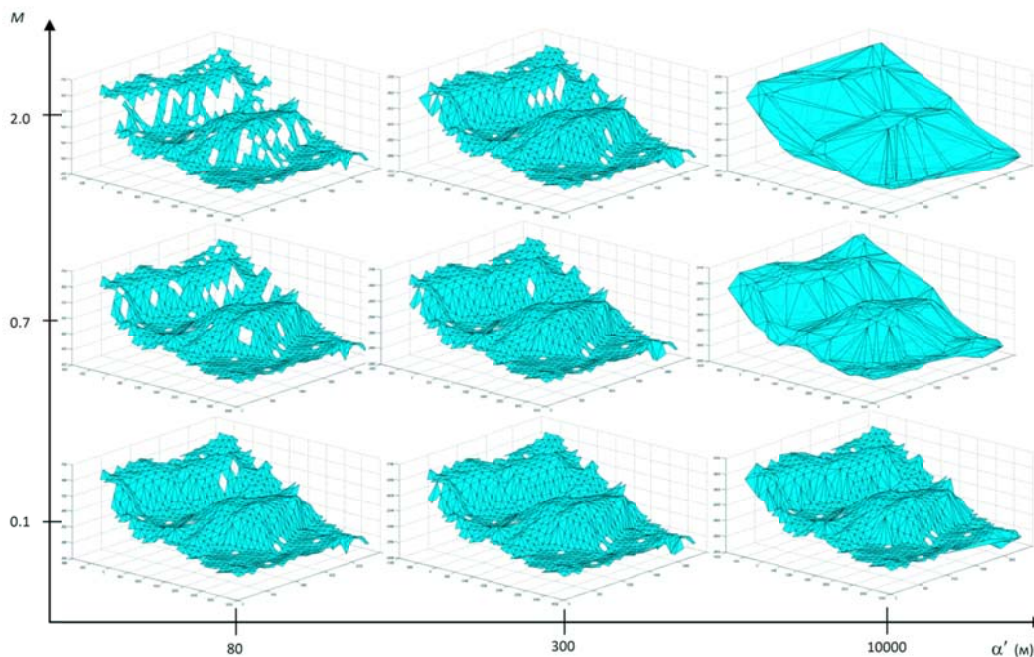


Рис. 3. Графики результатов трехмерной триангуляции Делоне глубин, представленных на рис. 2а в зависимости от параметров  $M$  и  $\alpha'$

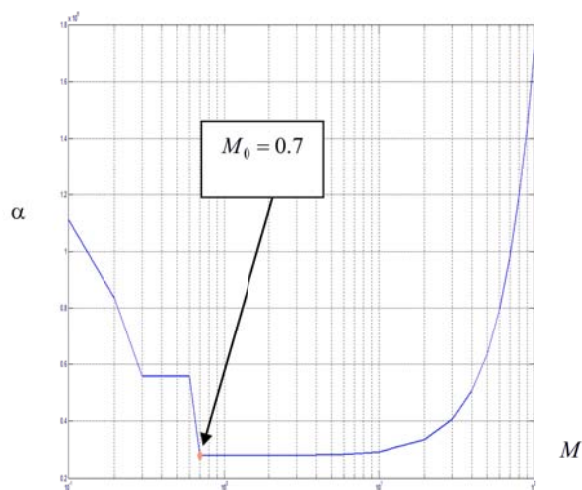


Рис. 4. График изменения радиусов описанных окружностей. Ось абсцисс дана в логарифмическом масштабе

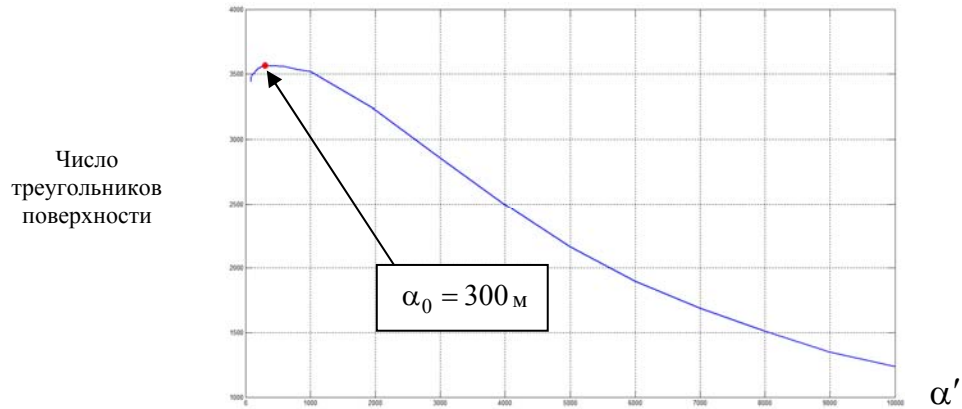


Рис. 5. График изменения числа треугольников трехмерной триангуляции, образующих поверхность

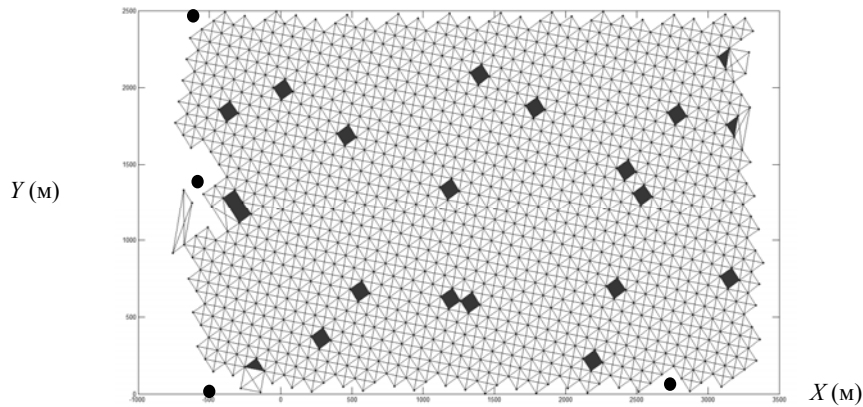


Рис. 6. График ребер, образованных между точками промера при  $M=0,7$  и  $\alpha'=300$  м. Черными кружками указаны точки измерения глубин, исключенные в процессе триангуляции. Внешние туннели закрашены черным цветом

Процедура трехмерной триангуляции позволяет ввести несколько количественных критериев, с различных сторон характеризующих качество данных о глубинах. Эти критерии можно ввести разными способами, привязывая их формулировку к целям конкретной задачи. Не претендуя на окончательность, приведем несколько формулировок:

- вертикальная погрешность восстановления рельефа ( $\Delta h$ ): отношение объема  $\{\alpha \leq \alpha_0\}_{M_0}$  к площади поверхности;
- достаточность плотности точек: первые три числа Бетти, отношение площади внешних туннелей в триангуляции к общей площади промера ( $s'$ );
- минимальный линейный масштаб пространственного разрешения ( $\Delta L$ ): длина стороны равностороннего треугольника с площадью, равной среднему арифметическому значению площадей треугольников поверхности трехмерной триангуляции.

Очевидно, что чем больше значение любого из этих параметров для конкретного набора данных гидрографической съемки, тем хуже «качество» этих данных для восстановления рельефа дна. Для данных, представленных на рис. 3, значения перечисленных параметров приведены в таблице.

Заметим, что в приведенном выше примере для варианта триангуляции с оптимальными параметрами  $M = 0,7$  и  $\alpha' = 300$  м множество «верхних» и «нижних» точек совпадают. Это видно на рис. 5.

**Таблица оценки критериев «качества» данных о глубинах, представленных на рис. 2а (для всех параметров  $\beta_2 = 0$  – пустот и внутренних туннелей нет)**

$M / \alpha'$	80 м	300 м	10000 м
2,0	$\Delta h = 0,41$ м $\beta_0 = 24, \beta_1 = 51$ $s' = 11,1\%, \Delta L = 107,1$ м	$\Delta h = 0,41$ м $\beta_0 = 4, \beta_1 = 28$ $s' = 2,9\%, \Delta L = 108,2$ м	$\Delta h = 27,42$ м $\beta_0 = 1, \beta_1 = 0$ $s' = 0\%,$ $\Delta L = 316,7$ м
0,7	$\Delta h = 0,41$ м $\beta_0 = 13, \beta_1 = 30$ $s' = 4,2 \Delta L = 107,1$ м	$\Delta h = 0,41$ м $\beta_0 = 5, \beta_1 = 20$ $s' = 2,1\%, \Delta L = 107,5$ м	$\Delta h = 16,12$ м $\beta_0 = 1, \beta_1 = 1$ $s' = 0,5\%,$ $\Delta L = 192,2$ м
0,1	$\Delta h = 0,41$ м $\beta_0 = 12, \beta_1 = 17$ $s' = 1,9\%, \Delta L = 107,1$ м	$\Delta h = 0,41$ м $\beta_0 = 5, \beta_1 = 17$ $s' = 1,9\%, \Delta L = 107,5$ м	$\Delta h = 1,57$ м $\beta_0 = 3, \beta_1 = 19$ $s' = 2,0\%,$ $\Delta L = 111,1$ м

Представленное в таблице относительно большое число связанных компонентов триангуляции для некоторых параметров  $M$  и  $\alpha'$  объясняется наличием точек измерения на границе области промера, исключенных из схемы триангуляции, например, как представлено на рис. 5.

Представленная схема трехмерной триангуляции очевидным образом детализируется до алгоритма и программной реализации. Применение трехмерной триангуляции позволяет получить оценки погрешности, масштаба и степени достаточности наблюдений, по которым восстанавливается поверхность рельефа, то есть оценить качество исходных точечных глубин для построения рельефа дна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Edelsbrunner H. Alpha Shapes – A Survey // Tessellations in the Sciences; Virtues, Techniques and Applications of Geometric Tilings Visualization and Data Analysis, 2010. – P. 1–25.
2. Alliez P., Cohen-Steiner D., Yvinec M., Desbrun M. Variational Tetrahedral Meshing // ACM Transactions on Graphics, 2005, 24 (3). PP. 617–625.
3. Shewchuk J. R. What Is a Good Linear Finite Element? Interpolation, Conditioning, Anisotropy, and Quality Measures. University of California at Berkeley – Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2002. – 70 p.
4. Калиткин Н. Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
5. Зейферт Г., Трельфалль В. Топология. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 448 с.

***EVALUATION METHOD OF DEPTH DATA QUALITY USED TO DISPLAY THE BOTTOM CONFIGURATION***

**Y. N. Zhukov** («GNINGI» OJSC)

*The employment of 3D Delaunay triangulation used to evaluate the characteristics of the depths quality for reconstruction of the bottom relief surface is introduced and substantiated. An example of using the 3D triangulation with evaluation of the initial data quality characteristics is given.*

УДК 528.92

***КРИТЕРИЙ КОРРЕКТНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ГАРМОНИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ***

**Ю. Н. ЖУКОВ**  
(ОАО «ГНИНГИ»)

*В гармоническом анализе приливов длина интервала наблюдений определяет число и значения частот приливных гармоник, используемых для анализа. В традиционных методах гармонического анализа приливов необходимая длина наблюдений определяется критерием Рэлея. Однако при использовании метода наименьших квадратов этот критерий не эффективен. В статье определяется специальный критерий для метода наименьших квадратов.*

Корректность результатов гармонического анализа приливов определяется согласованностью между набором приливных гармоник и длиной интервала наблюдений за уровнем моря, используемых для расчета гармонических постоянных. Задача определения этого согласования является первой из многих задач, решаемых при гармоническом анализе приливов. Длина временного ряда наблюдений определяет как число, так и набор приливных гармоник, для которых могут быть получены репрезентативные оценки гармонических постоянных. Это является следствием того, что частоты приливных гармоник в полусуточном и суточном диапазонах частот очень близки между собой, что приводит к невозможности разделить два периодических колебания со смежными частотами в условиях присутствия шумовой составляющей в исходных наблюдениях. Длина интервала наблюдений является фундаментальным параметром, ограничивающим и определяющим возможный для расчета набор приливных гармоник. Очевидно, что в каждом алгоритме расчета гармонических постоянных должен присутствовать блок операций, осуществляющий проверку согласованности длины ряда наблюдений для расчета заданного набора приливных гармоник. Именно согласованность этих двух параметров обеспечивает получение корректных вычислений наборов гармонических постоянных.

В отечественной литературе, посвященной расчету приливных гармонических постоянных (см., например, работы [1, 2]), проблема определения длины временного ряда наблюдений, необходимого для конкретного набора частот приливных

гармоник, не получила должного освещения, за исключением работ начала XX века [3].

Вычисление гармонических постоянных приливных колебаний относительно сложный и трудоемкий процесс. До появления ЭВМ вычисления проводились ручным способом на основе так называемых селективных методов выявления скрытых периодических составляющих в рядах наблюдений за уровнем моря. Эти методы базировались на некоторых косвенных предположениях о существующих соотношениях между гармоническими постоянными [3], что позволяло существенно уменьшить число необходимых арифметических вычислений. С появлением ЭВМ проблема, связанная с проведением большого числа арифметических вычислений отпала. Теперь математической основой оценки гармонических постоянных во всех без исключения автоматизированных методах расчета служит метод наименьших квадратов как наиболее эффективный вычислительный метод, хотя и требующий выполнения значительно большего числа элементарных арифметических операций.

В селективных методах связь между длиной интервала наблюдений и допустимыми наборами приливных гармоник решается на основе использования критерия Рэлея, который позволяет определить при заданной длине временного ряда наблюдений возможность эффективного разделения двух конкретных приливных гармоник. Обычно критерий Рэлея формулируется следующим образом [4]. Если  $f_0$  и  $f_1$  частоты некоторых двух приливных гармоник, а интервал наблюдений за уровнем моря равен  $T$ , тогда разделение возможно, если

$$|f_0 - f_1|T \geq R, \quad (1)$$

где  $R$  – некоторая числовая константа, обычно принимаемая за единицу. Используя выражение (1), можно получить оценку минимально необходимой длины интервала наблюдений для разделения двух близких по частотам приливных составляющих, например, для приливных гармоник  $M_2$  и  $S_2$  имеем  $\frac{360^\circ}{|28^\circ,98 - 30^\circ,0|} \approx 352,9$  часов

(14,7 суток), тогда как для составляющих  $S_2$  и  $K_2$  требуется уже 182,7 суток. В работе [4] приведены упорядоченные таблицы минимально необходимых интервалов наблюдений более чем для 60 основных приливных составляющих, рассчитанных по критерию (1).

Выражение (1) является для селективных методов расчета гармонических постоянных естественным критерием отбора допустимых приливных гармоник по заданной длине временного ряда наблюдений. Это следствие того, что в селективных методах расчет гармонических постоянных для конкретной приливной гармоники базируется на функциональном преобразовании суммы всех наблюденных высот уровня моря за интервал времени, строго кратный периоду приливной гармоники [3]. Заметим, что именно использование критерия Рэлея в селективных методах приводит к тому, что каждый селективный метод расчета гармонических постоянных использует свою длину ряда наблюдений и свой набор приливных гармоник.

Критерий Рэлея применяется и в алгоритмах расчета гармонических постоянных методом наименьших квадратов [4, 5]. Однако метод наименьших квадратов был разработан Гауссом как общий метод оценки параметров линейных

уравнений задолго до возникновения метода гармонического анализа приливов. В самом методе наименьших квадратов нет никаких явных или скрытых свойств, связанных с периодичностью каких-либо колебательных процессов в анализируемых данных, он не имеет никаких требований к длине исходного ряда наблюдений и набору приливных гармоник. Действительно, метод наименьших квадратов, адаптированный для расчета гармонических постоянных, представляет собой математический способ решения чисто матричного уравнения [2]:

$$B\mathbf{x} = \mathbf{y}. \quad (2)$$

где  $\mathbf{x} = (C_1, \dots, C_M, S_1, \dots, S_M)^T$ ,

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N y_i \cos \omega_1 t_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N y_i \cos \omega_M t_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \sin \omega_1 t_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N y_i \sin \omega_M t_i \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} CC_{11} & \dots & CC_{1M} & CS_{11} & \dots & CS_{1M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ CC_{M1} & \dots & CC_{MM} & CS_{M1} & \dots & CS_{MM} \\ SC_{11} & \dots & SC_{1M} & SS_{11} & \dots & SS_{1M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ SC_{M1} & \dots & SC_{MM} & SS_{M1} & \dots & SS_{MM} \end{pmatrix},$$

$$CC_{kj} = \sum_{i=1}^N (\cos \omega_k t_i) (\cos \omega_j t_i) = CC_{jk} \quad (3)$$

$$SS_{kj} = \sum_{i=1}^N (\sin \omega_k t_i) (\sin \omega_j t_i) = SS_{jk}, \quad (4)$$

$$CS_{kj} = \sum_{i=1}^N (\cos \omega_k t_i) (\sin \omega_j t_i) = SC_{jk}. \quad (5)$$

Здесь  $\omega_j$  – угловая частота приливной гармоники,  $N$  – число наблюдений за уровнем моря,

$t_i$  – моменты времени наблюдений,  $y_i$  – наблюдаемые уровни моря,  $M$  – число приливных гармоник,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $j, k = 1, 2, \dots, M$ .

Матричное уравнение (2) вычисляется методом наименьших квадратов. В результате получают вектор значений  $\mathbf{x}$ . Элементы этого вектора определяют значения гармонических постоянных: амплитуды  $A_j = (C_j^2 + S_j^2)^{1/2}$  и фазы  $\varphi = \arctan S_j / C_j$  приливных гармоник.

Очевидно, что формальное решение матричного уравнения (2) методом наименьших квадратов никак не связано с критерием (1). Однако существует неявная сложная опосредованная связь между длиной ряда наблюдений и набором приливных гармоник. Связь эта отражается коэффициентами матрицы  $B$ , так как ее элементы определяются соотношениями (3), (4), (5), то есть наборами частот приливных гармоник и длительностью наблюдений. Все это наводит на мысль, что для выявления критерия, аналогичного (1), для метода наименьших квадратов необходимо использовать анализ математических свойств решения матричного уравнения (2).

Проведем анализ оценки устойчивости квадратной матрицы  $B$  в уравнении (2), и покажем, что свойства этой матрицы действительно определяют степень корректности вычислений гармонических постоянных методом наименьших квадратов. Так, для решения (2) необходимо вычислить матрицу  $B^{-1}$ , обратную матрице  $B$  ( $B^{-1} \cdot B = 1$ ). Очевидно, что при численном решении получить абсолютно точную обратную матрицу заданной матрице невозможно вследствие ошибок округления, а, следовательно, невозможно точно оценить искомые гармонические постоянные. Кроме того, наличие шума в исходных данных (в матрице  $\mathbf{y}$ ) добавляет погрешность в конечном результате.

Рассмотрим, как соотносятся погрешности решений уравнения (2) с решением аналогичного уравнения с той же матрицей  $B$ , но возмущенной правой частью  $B(\mathbf{x} + \xi) = \mathbf{y} + \mathbf{g}$ . Здесь через  $\xi$  обозначено возмущение решения  $\mathbf{x}$ , вызванное возмущением  $\mathbf{g}$  правой части  $\mathbf{y}$ . Так как справедливо  $B\xi = \mathbf{g}$ , то в соответствии с теорией матричного анализа [4] имеем

$$\frac{\|\xi\|}{\|\mathbf{x}\|} = \frac{\|B^{-1}\mathbf{g}\|}{\|\mathbf{x}\|} \leq \frac{\|B^{-1}\| \|\mathbf{g}\|}{\|\mathbf{x}\|} \leq \frac{\|\mathbf{g}\|}{\|\mathbf{y}\|} \|B^{-1}\| \frac{\|\mathbf{y}\|}{\|\mathbf{x}\|} = \frac{\|\mathbf{g}\|}{\|\mathbf{y}\|} \|B^{-1}\| \frac{\|B\mathbf{x}\|}{\|\mathbf{x}\|} \leq \|B\| \|B^{-1}\| \frac{\|\mathbf{g}\|}{\|\mathbf{y}\|} = \mu(B) \frac{\|\mathbf{g}\|}{\|\mathbf{y}\|}. \quad (6)$$

Здесь двойные вертикальные линии обозначают матричную норму.

Неравенство (6) оценивает величину  $\|\xi\|/\|\mathbf{x}\|$  относительной погрешности решения системы  $B(\mathbf{x} + \xi) = \mathbf{y} + \mathbf{g}$  через относительную погрешность  $\|\mathbf{g}\|/\|\mathbf{y}\|$  правой части, а величина  $\mu(B)$  при этом служит в качестве коэффициента усиления погрешности правой части. По этой причине параметр  $\mu(B) = \|B\| \|B^{-1}\|$  называют числом обусловленности матрицы  $B$  (или числом обусловленности системы типа (2)). Если матрица  $B$  вырождена, то считают  $\mu(B) = \infty$ . Этот параметр является



безразмерной характеристикой матрицы  $B$ , то есть  $\mu(\rho B) = \mu(B)$ , где  $\rho \neq 0$ . Из тождества  $BB^{-1} = 1$  выводится неравенство  $\mu(B) \geq 1$ .

Из теории матричного анализа [6] известно, что на конкретной ЭВМ для конкретной матрицы  $B$  можно либо получить утверждение о том, что  $\mu(B)$  больше некоторого критического значения  $\mu^*$ , либо вычислить  $\mu(B)$ ,  $\mu(B) \leq \mu^*$  с достаточной точностью.

Величина  $\mu^*$  характеризует наибольший уровень числа обусловленности, ниже которого система линейных уравнений (2) «практически» разрешима, т. е. можно провести безаварийные вычисления на ЭВМ для определения решения с некоторой приемлемой точностью. Значение параметра  $\mu^*$  на практике выбирается волевым образом, но при этом все-таки разумная верхняя грань для такого выбора должна учитывать теорию возмущений и анализ погрешностей округления алгоритма решения, чтобы гарантировать безаварийность и точность при вычислениях. Когда  $\mu^*$  уже зафиксировано, то при  $\mu(B) \leq \mu^*$  систему (2) решают на ЭВМ, а при  $\mu(B) > \mu^*$  отказываются от решения, диагностируя при этом слишком большое число обусловленности, которое не позволяет вычислить решение (2) с гарантируемой приемлемой точностью. Используя результаты работы [7] можно показать, что  $\mu^* \approx M/3$ , а в качестве критерия допустимости расчета гармонических постоянных для заданного набора приливных гармоник и заданной длины интервала наблюдений с помощью метода наименьших квадратов (2) положить выполнение условия

$$\frac{\sigma_{\max}(B)}{\sigma_{\min}(B)} \leq \mu^*, \quad (7)$$

где  $\sigma_{\max}(B)$  и  $\sigma_{\min}(B)$  – максимальное и минимальное сингулярные числа матрицы  $B$ .

Таким образом, получен критерий согласованности длины временного интервала наблюдений за уровнем моря и заданного набора приливных гармоник. Критерий (7) позволяет получить гарантированные корректные вычисления гармонических постоянных методом наименьших квадратов для заданного набора приливных гармоник и определенной длины интервала наблюдений. Критерий (7) является аналогом критерия (2) для метода наименьших квадратов. При нарушении критерия (7) ошибки в оценке гармонических постоянных возрастают с экспоненциальной скоростью, поэтому оценку (7) необходимо включать во все алгоритмы расчета гармонических постоянных методом наименьших квадратов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Правила Гидрографической службы №35. Приведение глубин к уровню (ПГС №35). – Л.: УНГС ВМФ, 1956. – 193.
2. Пересыпкин В. И. Аналитические методы учета колебаний уровня воды. – Л.: ГИМИЗ. – 1982. – 287 с.
3. Никитин М.В. Гармонический анализ приливов. – Л., Гидрографическое управление СССР, 1925. – 168 с.
4. Foreman M. G. G., Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction. Pacific Marine Science Report 77–10. – Sidney: Institute of Ocean Sciences, 1996. – 58 pp.

5. Tianhang H., Vanicek P. Towards a real-time tidal analysis and prediction // Inter. Hydrogr. Rev. – 1994.– Vol. LXXI. – No. 1. – P. 29–52.
6. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. – М.: Мир, 1989. – 655 с.
7. Малышев А. Н. Введение в вычислительную линейную алгебру – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1991. – 229 с.

**CRITERION OF CORRECTNESS FOR CALCULATION OF HARMONIC CONSTANTS BY THE LEAST SQUARES METHOD**

**Y. N. Zhukov** («GNINGI» OJSC)

*The method used to evaluate the admissible interval of sea level observations in calculation of the harmonic constants for the sea level tidal variations by the least squares method is considered.*

УДК 551.326.6/7+62

**О ПРОВЕДЕНИИ МЕРОПРИЯТИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ  
ЛЕДОВОЙ УГРОЗЫ МОРСКИМ СООРУЖЕНИЯМ**

**Г. А. ЛЕБЕДЕВ, В. П. ТРИПОЛЬНИКОВ**  
(ФГБУ «ААНИИ»)

*Предлагается определять критерий опасности позиции айсберга относительно морского сооружения по вероятности его фатального перемещения в контакт и при наличии угрозы по данному критерию проводить активное противодействие дальнейшему движению айсберга с соблюдением безопасности в операциях его буксировки или разрушения взрывами.*

Проблемы навигации и морской хозяйственной деятельности, создаваемые дрейфующими льдами как в Арктике, так и в Антарктике, закономерны в целом и случайны в конкретных ситуациях. Вероятностные модели ледовых угроз [1] показывают весьма малые, но не нулевые значения вероятностей катастрофического столкновения судов и морских сооружений с айсбергами. Статистические модели не дают однозначного ответа на вопрос, в какой год на интервале повторяемости угроза реализуется, а также о предстоящей траектории и скорости движения ледового объекта, оказавшегося в опасной близости к морскому сооружению (МС). В обиходе события, которые реализуются вопреки благополучным прогнозам и очевидным обстоятельствам, именуется *фатальными*, при этом подразумевается иррациональность происходящего. В рациональном смысле фатальными событиями следует считать любые исходы в замкнутой информационной системе (ИС) случайных событий. Замкнутость ИС обеспечивается наличием в ней всех возможных независимых исходов и определяет неизбежность (фатальность) отдельного исхода независимо от степени изученности статистики конкретной ИС. Однако можно избежать и такого исхода на основании первичной информации путем упреждающего активного противодействия потенциальной угрозе. На вопрос, где и когда надо приступить к активному противодействию, один из возможных ответов следует из максимальной информационной энтропии фатальных событий.

Независимо от их природного происхождения: в неопределённом будущем все возможные исходы в независимых информационных системах равновероятны.

В работе [2] предложено квалифицировать угрозу фатально катастрофического столкновения МС, в том числе судов, с айсбергами и другими опасными дрейфующими ледовыми объектами (ДЛО) совпадением внешних обстоятельств случайного происхождения:

- отсутствием информации о состоянии ледовой обстановки на акватории (прямой видимости по оптическим, радио- и гидроакустическим средствам наблюдения, имеющимся на борту МС, и аэрокосмического мониторинга акватории) с вероятностью  $p_1$ ;

- внезапным появлением ДЛО в опасной близости к МС с вероятностью  $p_2$ ;

- движением объектов по пересекающимся курсам с вероятностью  $p_3$ ;

- превышением кинетических характеристик объектов сближения допустимых значений с вероятностью  $p_4$ .

Каждое из перечисленных обстоятельств есть ИС двух исходов:  $p_i$  и  $(1 - p_i)$ .

Количественная мера угрозы выражается произведением вероятностей  $P^* = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4$ , или информационной энтропией объединённой системы 16 исходов.

Первое обстоятельство может иметь три существенно важных значения вероятности:  $p_1 = 0$  соответствует качественному мониторингу, обеспечивающему обнаружение и сопровождение ДЛО, что исключает угрозу столкновения, так как можно либо совершить маневр, либо разрушить ДЛО, при том, что МС заведомо оснащено необходимым техническим арсеналом;  $p_1 = 0,5$  соответствует неоднозначной интерпретации наблюдений при наличии помех в бортовых системах наблюдения и данных аэрокосмических систем; также неопределённо состояние мониторинга в отдалённом будущем;  $p_1 = 1$  соответствует априори угрожающей ситуации, что обязательно требует принятия защитных мер от столкновения объектов.

Второе обстоятельство не реализуется ( $p_2 = 0$ ) при отсутствии ДЛО в акватории или принятии решения о невозможности внезапного появления ДЛО по географическим условиям, или в связи с наличием искусственных преград, или сторожевых сигнальных объектов, а также при качественном мониторинге ( $p_1 = 0$ ). В акваториях, где существование ДЛО неизбежно, появление хотя бы одного из них в любом месте, открытом для свободного дрейфа, при отсутствии качественного мониторинга ( $0 < p_1 \leq 1$ ) следует считать неопределённым, т. е. с вероятностью  $p_2 = 0,5$ . Получить иные оценки  $p_2$  можно по доле площади, занимаемой различными ДЛО [1, 2], из архивов наблюдений. Вероятность пересекающихся курсов движения ( $p_3$ ), включая встречное движение, может быть любой, так же, как и вероятность недопустимых по величине кинетических параметров ДЛО и МС при возможном столкновении ( $p_4$ ). Фатальность катастрофического исхода в этой системе обстоятельств проявляется при малых вероятностях  $p_{1,2,3,4} < 0,5$  вопреки ожиданиям и прогнозам. Однако максимальная вероятность такого непредсказуемого

исхода по жребью равна  $P^* = 0,0625$ , и функция риска принятия решений [2] по шкале информационной энтропии в такой ситуации максимальна. При увеличении вероятностей  $p_{1,2,3,4} > 0,5$  функция риска непредсказуемого исхода убывает, и риски принятия решений уменьшаются по причине обнаруженного роста вероятности угрозы. Риски принятия решений в данном случае возникают от необходимости выбора: защищать от повреждения МС или отказаться от затрат на безопасность, которые, возможно, окажутся лишними.

Предлагаемая концепция безопасности состоит в том, что при вероятности  $P^* \geq 0,0625$  проведение мероприятий безопасности следует считать обязательным. Это либо маневр в случае судна, либо буксировка ДЛО в отдаление от МС, либо разрушение ДЛО. Поэтому будем считать, что для оценки безусловной опасности фатально неблагоприятного исхода по выбранному предельному состоянию достаточно иметь информацию об этом с вероятностью 0,0625.

В практической ситуации необходим реально измеряемый критерий опасности. В частности, он может быть определен следующим образом. Допустим, на некотором удалении от МС надежно обнаружен ДЛО большой массы и глубины осадки. Соответствующая этому информационная система угрозы характеризуется вероятностями  $p_1 = 0$ ,  $p_2 = 0$ ,  $p_3 = 0,5$ ,  $p_4 = 1$ . Вероятность фатального исхода равна нулю, так как проводятся наблюдения за направлением и скоростью дрейфа. В отдалённом будущем окно для мониторинга акватории может оказаться закрытым. Тогда в информационной системе угрозы с учетом ранее полученных сведений  $p_1 = 1$ ,  $p_2 = 0,5$ ,  $p_3 = 0,5$ ,  $p_4 = 1$ ,  $P^* = 0,25$ , т. е. опасность фатального исхода преувеличена, так как до потери наблюдений она была равна нулю. Для оценки реальной опасности необходимо уточнить  $p_2$  и  $p_3$  через функцию расстояния между объектами потенциального сближения, а именно рандомизировать её также по системе жребия.

Следуя модели [1], пусть  $L$  – расстояние между центрами фигур ДЛО и МС,  $2A$  – максимальный размер ДЛО в плане. Радиус  $A$  окружности, описывающей контур ДЛО в плане, есть его прицельный параметр. Аналогичная характеристика должна быть определена и для МС. Для стационарных МС она должна, по-видимому, включать зону контроля и/или критическую зону в окружении основного объекта, попадание в которую ДЛО недопустимо, либо по причине наличия в ней инфраструктурных объектов либо по фактору времени подготовки аварийно-спасательных мероприятий. Для судов оно определяется, по меньшей мере, радиусом маневра при изменении курса на траверз.

Пусть прицельный параметр МС –  $B$ . Тогда  $L = n(A + B)$ , где  $n \gg 1$  – целое число. Максимальная вероятность фатального перемещения ДЛО в неопределённом будущем на одну из « $n$ » позиций, в том числе в контакт с МС, равна  $1/n = (A + B)/L = p_2$ . При этом следует допустить  $p_3 = 1$  на всем пути перемещения. Следовательно, необходимым и достаточным условием проведения мероприятий безопасности МС при обнаружении ДЛО для предотвращения фатального столкновения с ним является  $1/n \geq 0,0625$ ,  $L \leq 16(A + B)$ . Отметим, что в случае МС – трубопровода,  $L$  берётся кратчайшим из возможных значений. Если предварительным мониторингом установлена величина  $p_2 \ll 0,5$ , то для принятия

решения о противодействии угрозе следует рандомизировать по жребию возможные направления движения ДЛО ( $p_3$ ) и также оценивать получаемую величину  $P^*$  относительно критерия 0,0625. Интервал времени от момента обнаружения до момента контакта с МС по причине фатально неблагоприятных обстоятельств, а именно прямолинейного движения на сближение с максимальной скоростью  $V_m$ ,

$$t = 16(A + B)/V_m \quad (1)$$

должен указывать на необходимый темп подготовки и проведения мероприятий безопасности.

Скорость дрейфа ледяного покрова в Арктике [3] и скорость дрейфа отдельных айсбергов по чистой воде [4, 5] не превышает 0,5 м/с. Следовательно, на принятие решения и проведение активных воздействий после обнаружения угрожающего ДЛО имеется время  $1 \leq t \leq 10$  час соответственно при  $0,1 \leq (A + B) \leq 1$  км. Такого диапазона времени может быть недостаточно по техническим причинам. Тогда величина  $t$  устанавливается по фактическим потребностям, а граница критической зоны акцентируется на расстоянии  $L$  более чем  $16(A + B)$ . Отметим, что для судов  $V_m$  – скорость сближения,  $B$  – радиус маневра с уходом от столкновения,  $t$  – максимально допустимое время для маневра,  $16(A + B)$  – минимальная дальность судовых систем обнаружения ледовой угрозы.

При намерении отбуксировать ДЛО необходимо учитывать его остойчивость. Центр тяжести ДЛО позиционируется выше метацентров сил вытеснения, что при определенных условиях его опрокидывает и даже приводит во вращательное движение. Остойчивый ДЛО может совершать сложное свободное колебательное движение по углу крена и скольжению с круговой частотой

$$f = [g(|X - Z|)/k(X^2 + Z^2)]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $Z$  – плечо момента сил опрокидывания, равное характерной высоте ДЛО,  
 $X$  – плечо момента сил восстановления, равное характерной ширине ДЛО,  
 $g$  – ускорение силы тяжести,  
 $k$  – безразмерный коэффициент, учитывающий фигуру ДЛО и плотность льда.

При  $X = Z$  частота равна нулю, что соответствует безынерционной остойчивости при любом угле крена. С таким ДЛО опасно контактировать. Остойчивость сохраняется при  $X > Z$ . При  $X < Z$  движение ДЛО определяется суммой поплавокных колебаний и скольжением с угловой скоростью сваливания на борт, соответствующей (2). Характеристики  $X$  и  $Z$  реальных фигур ДЛО можно оценить по контуру и высоте надводной части. Например, у столообразного айсберга  $Z$  – полная по глубине высота,  $X$  – ширина «стола». Для других фигур это не всегда однозначно. Например, ледовый конус (киль) и округлый айсберг имеют примерно одинаковый надводный контур. В этих случаях для определения опасности ДЛО требуется экспертное заключение по архитектуре надводной части и/или опытная экспертиза вторичных признаков (термохалинных потоков, низкочастотных гидроакустических полей), и/или подводный мониторинг объекта. Дистанция

безопасности при обследовании подобных ДЛО, очевидно, не менее максимальной первичной оценки полной по глубине высоты. На этой же дистанции должен быть закончен маневр обхода ДЛО судном.

Альтернативой буксировке и маневру может быть разрушение угрожающего ДЛО взрывами с развалом его на части, характеристики  $X$  и  $Z$  которых не создают угрозы МС. Энергия взрыва должна быть достаточной для образования радиальных трещин во льду на расстояние  $Z$ , а расстояние между эпицентрами отдельных взрывов – не более  $2Z$  [6]. Расстояние пробега трещины во льду как горной породе теоретически равно

$$Z = (0,023 \div 0,0345) \cdot (qkm)^{1/3}, \quad (3)$$

где  $q$  – удельная энергия взрывчатого вещества,  
 $k$  – коэффициент эффективности позиции заряда,  
 $m$  – масса заряда, множители в скобках соответствуют диапазону модуля Юнга льда  $(3 \div 10) \cdot 10^3$  МПа.

При  $m = 1$  кг тротила и заряде сферической формы  $Z = 3,7 \div 5,5$  м. Фугасное действие и неравновесное напряженное состояние ДЛО после взрыва увеличивают длину трещин, что помогает развалить его на части более экономно по расходам и экологическим последствиям. С помощью физического моделирования можно определить наиболее производительные способы подготовки и проведения взрывного разрушения ДЛО при всём их многообразии. Безопасность проведения взрывотехнических работ в специфических условиях с опасными ДЛО еще не регламентирована. Известны [6] энергетические уровни ударного и фугасного воздействия взрыва на лёд и окружающую среду. По этим показателям представленный выше критерий дальности гарантирует безопасность МС от воздействия взрывов. Полезно разработать программу исследований для выработки нормативов и арсенала технических средств активного противодействия ледовой угрозе МС в части применения взрывных технологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Онищенко Д. А., Мирзоев Д. А. Вероятностная модель айсберговой угрозы как актуальная задача научного сопровождения проектов обустройства морских месторождений Баренцева моря // Сборник аннотаций докладов Международной конференции RAO/CIS OFFSHORE 2007. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2007. – С. 49 (Версия CD, доклад № 127).
2. Лебедев Г. А., Трипольников В. П. Информационный анализ обстановки на акватории для определения качества мониторинга и риска столкновения ледяных образований с морским сооружением // Метеорология и гидрология, 2012. – №. 2. – С. 72–77.
3. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. – М: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1980. – 189 с.
4. Pavac M., Coche E. A stochastic model of iceberg drift. Including wave effect // Сборник аннотаций докладов Международной конференции RAO/CIS OFFSHORE 2007. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2007. – С. 80 (Версия CD, доклад № 278).
5. Кулахтин А. А., Марченко А. В., Кабатченко И. М., Пнюшков А. В. Моделирование дрейфа айсбергов в Баренцевом море // Труды RAO GIS/OFFSHORE 2009, Санкт-Петербург, 2009. – Т. 2. – С. 197–201.
6. Патент на изобретение № 2310720 (Россия). Способ защиты подводных сооружений от давления дрейфующих ледовых образований. Приоритет от 02.05.2006 г. Авторы: Лебедев Г. А., Трипольников В. П.

***ON SAFETY MEASURES IN THE PRESENCE OF ICE HAZARD FOR MARINE STRUCTURES***

**G. A. Lebedev, V. P. Tripolnikov (AARI)**

*It is proposed to determine the criterion of hazard for the iceberg position relative to the marine structure, using the probability of its fatal movement to the contact. In the presence of the hazard by this criterion, it is suggested to take the active countermeasures to prevent the further movement of the iceberg, taking the precautions in the operations during its towing or destruction by explosions.*

---

# ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

---

УДК 551.466.3

## **ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ШТОРМОВ И ОКОН ПОГОДЫ**

**С. И. МАСТРЮКОВ**  
(ОАО «ГНИНГИ»)

*Изложен подход к моделированию временных рядов штормов и окон погоды по сведениям об их повторяемости. По результатам реанализа ветра в Норвежском, Баренцевом и Белом морях за 1975–2002 гг. получены статистические связи повторяемости штормов со средними значениями количества штормов и их непрерывной продолжительности, а также статистические связи между функциями распределения числа штормов и их непрерывной продолжительности со средними значениями количества штормов и их непрерывной продолжительности. На основе выявленных закономерностей построена вероятностная модель, позволяющая генерировать временную последовательность штормов и окон погоды. Верификация модели выполнена путем расчета невязок между задаваемой и модельной повторяемостью штормовых условий для совокупности из 100 рядов продолжительностью 1 месяц. Модель пригодна для расчета статистических характеристик окон погоды заданной непрерывной продолжительности, необходимых при планировании сложных морских транспортных операций.*

### **Введение**

Традиционные показатели ветро-волнового режима, такие как повторяемость штормовых (неблагоприятных) условий, недостаточны для адекватного планирования сложных морских транспортных операций. Для обеспечения безопасности и повышения эффективности операций по буксировке или транспортировке крупных объектов, оценки времени ожидания благоприятных условий, планирования перехода, выбора пунктов штормового отстоя, выбора скорости перехода и, соответственно, состава сил и средств для той или иной морской транспортной операции требуется знать характеристики окон погоды. К числу основных из них относятся: число окон погоды заданной непрерывной продолжительности той или иной обеспеченности, среднее и максимальное время ожидания окна погоды заданной обеспеченности в заданный месяц или сезон.

Для получения статистических оценок характеристик окон погоды лучше всего использовать результаты реанализа полей ветра и волнения за продолжительный период времени длительностью несколько десятков лет. Реализация такого подхода затруднена ввиду недостатка данных реанализа.



Известно несколько подходов к моделированию штормов и окон погоды по волновым условиям [1–3]. Относительно недавно [3] разработана одна из наиболее продвинутых в теоретическом отношении вероятностная модель волнения, основанная на теории периодически коррелированного случайного процесса (ПКСП). Эта модель позволяет генерировать ансамбль временных рядов среднемесячных значений высот волн в ПКСП приближении, которые в дальнейшем используются как переменный во времени уровень  $z$ , на который накладывается модель штормов и окон погоды в виде импульсного случайного процесса. Построение и реализации такого подхода требует детального вероятностного анализа режима штормового волнения и вызывает затруднения при практической реализации.

В настоящей работе развивается метод вероятностного моделирования штормов и окон погоды, предложенный автором в работе [4]. При этом подходе в качестве исходных данных о состоянии природной среды достаточно иметь сведения об интегральной повторяемости штормов, которые приведены в многочисленных пособиях по режиму ветра и волнения. Для построения модели используются сведения о статистических связях повторяемости штормов со средними значениями количества штормов и их непрерывной продолжительности, а также статистические связи между функциями распределения числа штормов и их непрерывной продолжительности со средними значениями количества штормов и их непрерывной продолжительности. В настоящей работе изложен подход к моделированию временных рядов штормов и окон погоды на примере ветровых условий.

#### ***Характеристика исходных данных***

Для подготовки массива данных о ветре на акватории Норвежского, Гренландского, Баренцева и Белого морей использована спектрально-параметрическая модель волнения ААНИИ [5]. Модель верифицирована, рекомендована для применения Центральной методической комиссией Росгидромета и используется в практике ГМЦ РФ.

Поле ветра рассчитано с использованием этой модели по архиву полей приземного давления Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Расчет выполнен с временным шагом  $\Delta t$  6 часов и пространственным шагом  $2,5^\circ$  для каждого узла расчетной области за период с января 1975 г. по декабрь 2002 г. с учетом среднего положения кромки льда. Для оценки статистических характеристик ветрового режима использованы восемь расчетных точек на акватории Норвежского, Баренцева и Белого морей.

#### ***Методика оценки статистических характеристик ветрового режима***

На первом этапе выполнена оценка среднемесячной повторяемости набора штормовых условий (критическая скорость ветра  $V$  более 10, 11, ... 23 м/с) для выбранных расчетных точек за период с 1975 по 2002 г.

Затем для градаций повторяемости штормовых условий (40–50, 30–40, 20–30, 15–20, 10–15, 5–7, 1–5%) были выбраны группы месяцев для каждой расчетной точки и соответствующего значения критической скорости ветра  $V$ . Для периодов времени, в которые отмечалась выбранная градация повторяемости штормовых условий, для каждого года с 1975 по 2002 были рассчитаны число штормов и непрерывная продолжительность штормов. По этим данным были рассчитаны средние значения непрерывной продолжительности и количество штормов (в месяц) для выбранных градаций повторяемости штормов, а также функции их распределения.

**Результаты оценки статистических характеристик ветрового режима**

Путем анализа данных о 1034 штормах на акватории Норвежского, Баренцева и Белого морей получена следующая связь между средней непрерывной продолжительностью шторма  $\tau$  и вероятностью штормовых условий  $P$ .

$$\tau = \frac{33}{\sqrt{-\ln P}} - 6,5, \quad 0,001 < P < 0,5. \quad (1)$$

В формуле (1) средняя непрерывная продолжительность шторма измеряется в часах, вероятность шторма  $P$  – в долях единицы. При повторяемости шторма 0,1% средняя непрерывная продолжительность шторма составляет 6 часов, что соответствует дискретности использованных четырех срочных результатов реанализа. При вероятности шторма 50% средняя непрерывная продолжительность шторма составляет 33 часа. Средняя квадратическая невязка полученной оценки  $\tau$  составляет 1,5 часа, максимальное отклонение от «фактической» средней непрерывной продолжительности не превышает 5 часов.

Среднее число штормов  $N$  за период продолжительностью  $T$  часов при известной средней непрерывной продолжительности шторма  $\tau$  рекомендуется оценивать по формуле:

$$N = \frac{TP}{\tau} = \frac{TP\sqrt{-\ln P}}{33 - 6,5\sqrt{-\ln P}}. \quad (2)$$

В формуле (2)  $T$  и  $\tau$  измеряются в часах,  $P$  – в долях единицы.

При анализе периодов продолжительностью 1 месяц, при повторяемости шторма  $P = 0,1\%$  среднее число штормов в месяц составляет 0,1. То есть за один месяц шторм будет наблюдаться один раз в 10 лет. При возрастании вероятности шторма до 50% среднее число штормов достигает 11 в месяц.

Эмпирические кривые плотности распределения числа штормов, полученные для восьми точек на акватории Норвежского, Баренцева и Белого морей за период с 1975 по 2002 гг. приведены на рис. 1а.

Анализ эмпирических функций распределения числа штормов показал, что двухпараметрическая функция распределения Вейбулла хорошо аппроксимирует распределение числа штормов при повторяемости штормов до 20%. При повторяемости штормов от 20 до 50% вместо функции распределения Вейбулла следует использовать нормальный закон распределения.

Для аппроксимации эмпирической функции распределения числа штормов  $n$  использована модифицированная функция распределения Вейбулла [6], имеющая для плотности распределения  $f(n)$  и интегральной функции распределения  $F(n)$  вид:

$$f(n) = \alpha \left( \frac{n+1}{\beta} \right)^{\alpha-1} \cdot \frac{1}{\beta} \exp \left[ - \left( \frac{n+1}{\beta} \right)^\alpha \right],$$

$$P(N < n) = F(n) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{n+1}{\beta} \right)^\alpha \right], \quad n \geq 0 \quad (3)$$

Параметры распределения Вейбулла  $\alpha$  и  $\beta$  связаны со средним и дисперсией числа штормов соотношениями:

$$\text{Среднее} = \beta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right) - 1. \text{ Дисперсия} = \beta^2 \left[ \Gamma\left(\frac{2}{\alpha} + 1\right) - \left(\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)\right)^2 \right],$$

где  $\Gamma$  – гамма-функция.

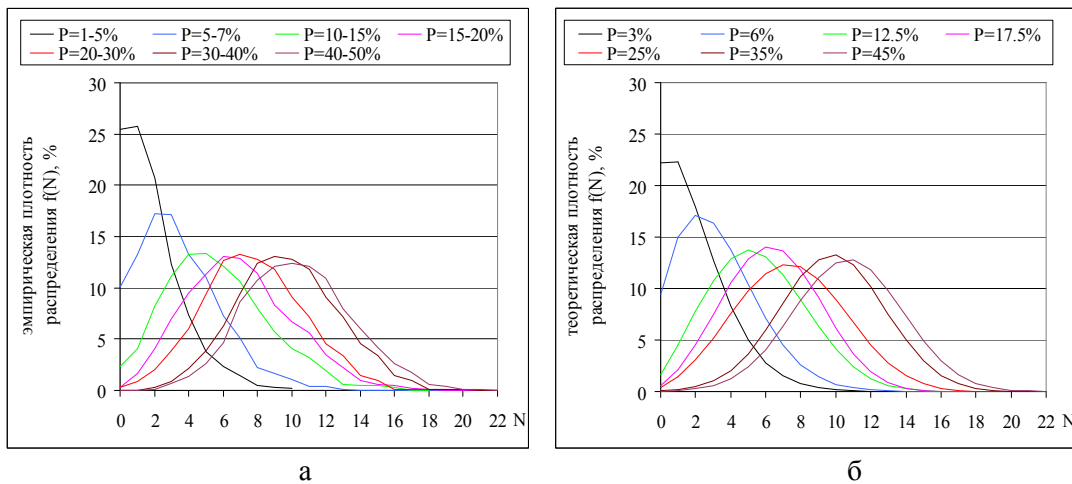
В табл. 1 приведены средние значения выбранных градаций повторяемости штормов, для которых по формуле (2) определены средние значения числа штормов и параметры выбранных законов распределения. Среднеквадратическое отклонение числа штормов от среднего для выбранных градаций повторяемости штормовых условий увеличивалось от двух для повторяемости штормов 1–5% до трех при повторяемости штормов 40–50%. При построении имитационной модели представляется допустимым среднее квадратическое отклонение задавать в этих же пределах. В настоящей работе СКО числа штормов принято постоянным для диапазона повторяемостей штормовых условий от 1 до 45% и равным 2,5.

Таблица 1

**Параметры модифицированного распределения Вейбулла и нормального закона распределения числа штормов**

Вероятность штормовых условий, %	3	6	12,5	17,5	25	35	45
Среднее число штормов в месяц	1,9	3,3	5,7	6,9	8,2	9,8	10,7
СКО	2	2,4	2,7	3	3	3	3
$\alpha$	1,47	1,87	2,62	2,84			
$\beta$	3,2	4,8	7,4	8,9			

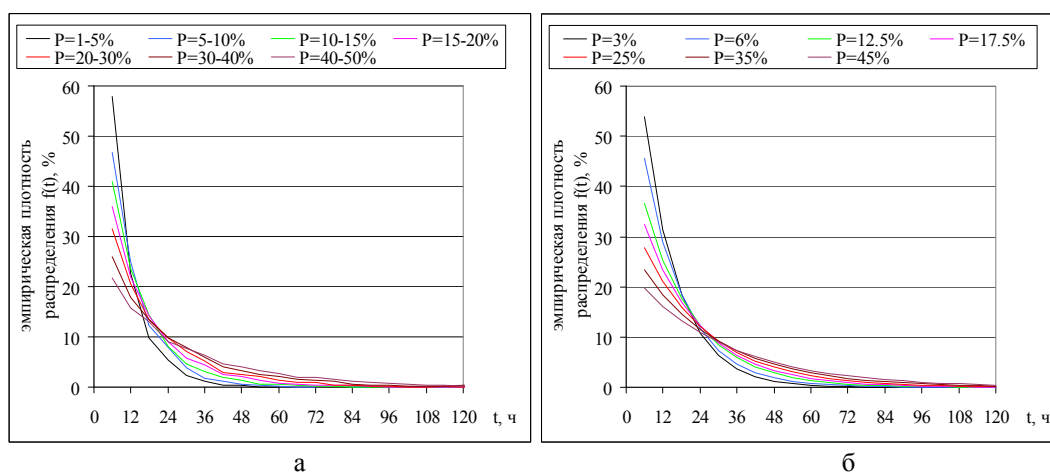
Аналитические кривые плотности распределения числа штормов, рассчитанные для середины выбранных градаций повторяемости штормов, приведены на рис. 1б.



**Рис. 1. Эмпирические (а) и аналитические (б) кривые плотности распределения числа штормов для выбранных градаций вероятности штормовых условий**

Среднеквадратическая невязка между эмпирической и аналитическими функциями плотности распределения числа штормов не превышает 1,3%, максимальная невязка – 3,5%, что свидетельствует о хорошем качестве аппроксимации.

Эмпирические кривые плотности распределения непрерывной продолжительности штормов, полученные для восьми точек на акватории Норвежского, Баренцева и Белого морей за период с 1975 по 2002 гг., приведены на рис. 2а.



**Рис. 2. Эмпирические (а) и аналитические (б) кривые плотности распределения непрерывной продолжительности одного шторма для выбранных градаций вероятности штормовых условий**

Эмпирическая функция распределения непрерывной продолжительности штормов удовлетворительно аппроксимируется модифицированной экспоненциальной функцией распределения с одним параметром  $\lambda$ .

Плотность распределения  $f(t)$  и интегральная функция  $F(t)$  модифицированного экспоненциального распределения [6] непрерывной продолжительности штормов  $t$  при дискретности временного ряда  $\Delta t$  имеют вид:

$$f(t) = \lambda \exp\left[-\lambda\left(\frac{t}{\Delta t} - 1\right)\right], \dots t \geq \Delta t, \dots \lambda > 0,$$

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\lambda\left(\frac{t}{\Delta t} - 1\right)\right]. \tag{4}$$

При этом параметр экспоненциального распределения  $\lambda$  связан со средней непрерывной продолжительностью шторма  $\tau$  и дискретностью ряда  $\Delta t$  соотношением

$$\lambda = \frac{\Delta t}{\tau}.$$

Таким образом, используя модифицированное однопараметрическое экспоненциальное распределение, определив по данным о повторяемости штормовых условий с применением формулы (1) среднюю непрерывную продолжительность шторма, можно рассчитать функцию распределения непрерывной продолжительности штормов.

В табл. 2 приведены средние значения выбранных градаций повторяемости штормов, для которых по формуле (1) определены средние значения продолжительности штормов и параметр модифицированного экспоненциального распределения для  $\Delta t=6$  часов.

Таблица 2

**Параметры модифицированного экспоненциального распределения непрерывной продолжительности штормов**

Вероятность штормовых условий, %	3	6	12,5	17,5	25	35	45
Средняя непрерывная продолжительность шторма, часы	11,1	13,2	16,4	18,5	21,5	25,7	30,4
$\lambda$	0,54	0,46	0,37	0,32	0,28	0,23	0,20

Аналитические кривые плотности распределения непрерывной продолжительности штормов, приведенные к выбранным градациям повторяемости штормов, приведены на рис. 2б. Среднеквадратическая невязка между аналитической и эмпирической плотностями распределения непрерывной продолжительности штормов для вероятности шторма выше 5% не превышает 2,0%, максимальная невязка составляет 6,0%, что можно признать удовлетворительным.

***Вероятностная модель штормов и окон погоды***

Задачей вероятностного моделирования является генерация значительного числа временных рядов заданной продолжительности, например, сезон или месяц, на которых должны быть специальным образом распределено разное число временных промежутков разной непрерывной продолжительности, которые представляют собой штормовые периоды. Это должно быть сделано так, чтобы:

- интегральная повторяемость штормовых условий (за 30–100 лет) соответствовала бы заданной повторяемости штормовых условий;
- число штормов, определенное по совокупности генерируемых рядов, подчинялось бы выбранному закону распределения;
- распределение непрерывной продолжительности штормов для каждого из генерируемых рядов подчинялась бы выбранному закону распределения.

По сведениям об интегральной повторяемости штормовых условий  $P$  оценивается среднее число штормов (2) и с использованием нормального распределения (при вероятности штормовых условий выше 20%) или распределения Вейбулла (3) определяется число рядов (лет)  $m$  с тем или иным количеством штормов  $n$ . Предположим, нам нужно сгенерировать  $M$  временных рядов, тогда число лет  $m$  с числом штормов  $n$  определяется по формуле:

$$m(n) = [M \cdot f(n) + 0,5], \quad (5)$$

где квадратные скобки обозначают оператор взятия целой части от действительного числа.

В качестве иллюстрации в табл. 3 приведены результаты расчета  $m(n)$  для  $M=100$  при вероятности штормовых условий 12,5%.

Таблица 3

Пример определения  $m(n)$  для  $M=100$  при вероятности штормовых условий  $P=12,5\%$

$n$ – число штормов	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$f(n)$	0,01	0,04	0,07	0,10	0,13	0,14	0,14	0,12	0,09	0,07	0,04	0,03	0,01	0,01
$m$ – число рядов (лет)	1	4	7	10	13	14	14	12	9	7	4	3	1	1

Таким образом, из ста рядов первый должен быть без штормов, следующие четыре ряда с одним штормом, следующие семь – с двумя и так далее.

На следующем шаге задается непрерывная продолжительность штормов  $t$  для каждого шторма генерируемого ряда. Если требуется сгенерировать ряд с одним штормом, его продолжительность принимается равной средней непрерывной продолжительности. Если требуется сгенерировать ряды с двумя и более штормами, предварительно рассчитывается продолжительность каждого из  $n$  штормов. Для этого с помощью выбранной аналитической функции распределения непрерывной продолжительности штормов  $F(t)$  (7) оценивается вероятность превышения непрерывной продолжительности шторма  $p(T>t)=1-F(t)$ . Нумеруя дискретный ряд  $i$  в порядке уменьшения непрерывной продолжительности штормов  $t$ , можно, задавая число штормов генерируемого ряда  $n$ , рассчитать число штормов  $k$  той или иной продолжительности  $t_i$ :

$$k(t_i) = [p(t_i) \cdot n] - [p(t_{i-1}) \cdot n] \quad (6)$$

В качестве иллюстрации в табл. 4 приведены результаты расчета числа штормов разной непрерывной продолжительности для вероятности штормовых условий 12,5%, для десяти и двух штормов в месяц.

Таблица 4

Пример определения  $k(t)$  для десяти и двух штормов в месяц при вероятности штормовых условий 12,5%

$t$	54	48	42	36	30	24	18	12	6
$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p(t_i)$	0,053	0,077	0,111	0,160	0,231	0,333	0,481	0,693	1,000
$k(t_i, n=10)$		0	1	0	1	1	1	2	4
$k(t_i, n=2)$		0	0	0	0	0	0	1	1

То есть для заданных условий (табл. 3, 4), например, из 100 генерируемых рядов семь рядов должны вмещать два шторма – один продолжительностью 6 часов, другой 12 часов, четыре ряда должны вмещать 10 штормов – четыре из них

продолжительностью 6 часов, два продолжительностью 12 часов, и по одному продолжительностью 18, 24, 30 и 42 часа.

После определения числа лет с тем или иным количеством штормов  $m(n)$  и числа штормов с той или иной непрерывной продолжительностью  $k(t,n)$  производится собственно генерация временных рядов. При отсутствии шторма каждый член временного ряда принимает значение равное нулю. В других случаях допускается, что сроки начала штормов в течение месяца (сезона) подчиняются закону равномерного распределения, т. е. равновероятны. Естественным ограничением при этом является лишь условие не пересечения двух штормовых периодов. Время начала  $tb$  и окончания  $te$  шторма связаны с непрерывной продолжительностью шторма  $t$  соотношением:  $te=tb+t/\Delta t-1$ .

По существу, собственно, имитационная модель основана на использовании генератора случайных чисел в диапазоне от первого до последнего номера члена генерируемого ряда для задания срока начала шторма. Окончание шторма определяется с учетом полученных оценок непрерывной продолжительности каждого из штормов. Значениям членов ряда на полученном участке присваивается значение, например, единица, что является признаком шторма. Если период нового шторма пересекается с периодом любого из ранее размещенных на временном отрезке штормов, срок начала шторма рассчитывается вновь с использованием того же генератора случайных чисел, если после 100 генераций случайных чисел это условие не выполняется, шторм «размещается» в любом месте временной последовательности.

На рис. 3 в качестве иллюстрации приведены результаты моделирования штормов и окон погоды для повторяемости штормовых условий 12,5%. Число рядов с количеством штормов  $Nst$  и непрерывная продолжительность штормов соответствуют данным, приведенным в табл. 3, 4.

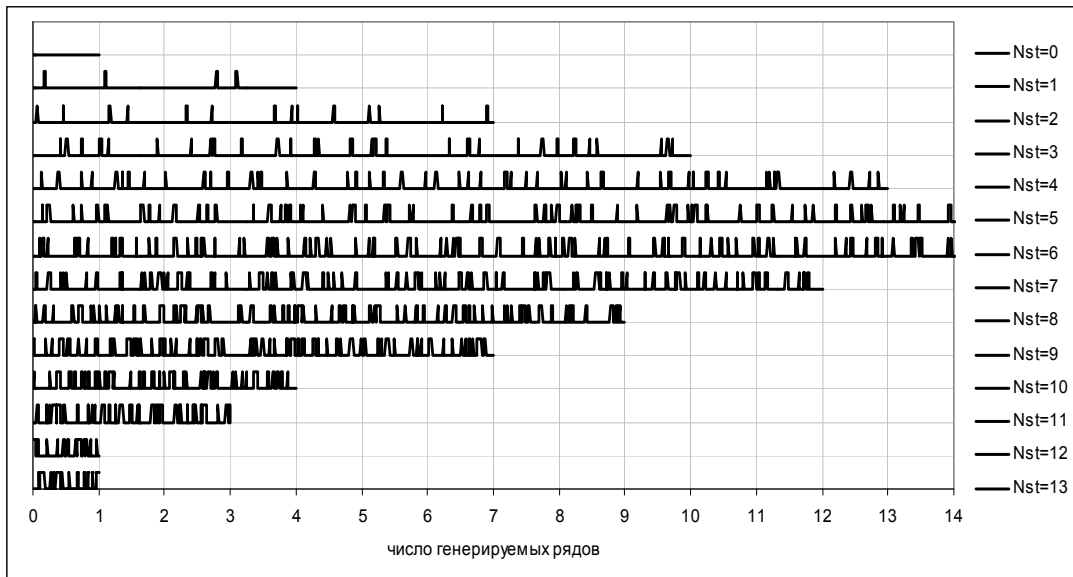


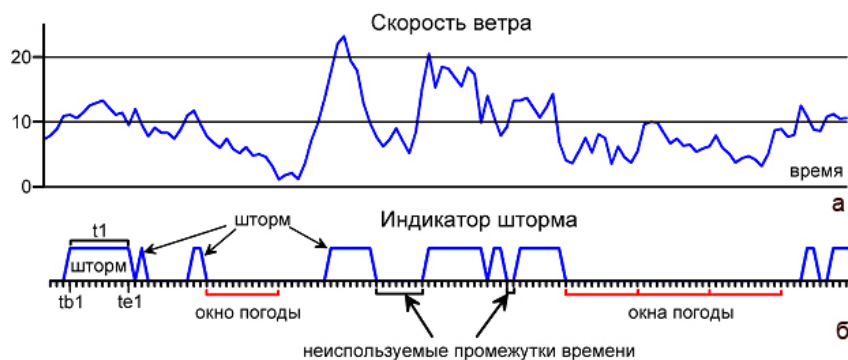
Рис. 3. Результаты моделирования 100 рядов штормов и окон погоды при повторяемости штормовых условий 12,5%

### Верификация модели

Для верификации модели выполнен расчет повторяемости штормовых условий по 100 генерируемым рядам месячной продолжительности. В диапазоне от 1 до 45% невязка результатов расчета с заданной повторяемостью штормовых условий не превысила 1%. Кроме этого, выполнен расчет среднего числа окон погоды продолжительностью 1–3 суток для всех сезонов года для двух контрольных точек, не использованных при построении имитационной модели. Максимальные невязки между средними значениями числа окон погоды, рассчитанные по данным реанализа и имитационного моделирования, не превысили 10%. Таким образом, реализовав изложенные процедуры, мы получаем совокупность временных рядов штормов и окон погоды, статистические характеристики которых соответствуют известным климатическим сведениям о повторяемости штормов и статистическим закономерностям распределения их количества и непрерывной продолжительности.

### Рекомендации по расчету статистических характеристик окон погоды и их использованию

На рис. 4 приведен пример временного хода скорости ветра (рис. 4а) и соответствующая ему временная развертка штормов и окон погоды (рис. 4б). Обычно под окном погоды понимают промежуток времени любой продолжительности, в пределах которого скорость ветра меньше заданной. Для выполнения транспортных и других морских операций имеют значение только те окна погоды, продолжительность которых позволяет выполнить запланированную операцию или ее этап с соответствующими ограничениями по скорости ветра. Поэтому в настоящей работе под окнами погоды понимаются окна погоды заданной непрерывной продолжительности. Если непрерывная продолжительность благоприятных условий больше заданной непрерывной продолжительности операции в целое число раз, то именно это число принимается за число окон погоды в рассматриваемый промежуток времени.



**Рис. 4. Временной ход скорости ветра (а) и соответствующая шторму скоростью более 10м/с временная развертка штормов и окон погоды (б)**

При заданной непрерывной продолжительности окна погоды на рис. 4 выделяются девять штормов и четыре окна погоды.

При планировании морских операций, помимо сведений о количестве окон погоды в тот или иной месяц или сезон, для оценки экономических затрат нужны сведения о статистических характеристиках времени ожидания окна погоды. Под



временем ожидания понимается время ожидания ближайшего окна погоды после окончания текущего окна погоды или с начала месяца.

Характеристики окон погоды зависят не только от ветрового (ветро-волнового) режима по маршруту перехода, но и от длины маршрута, проектной скорости перехода, которая определяется нарядом сил, выделенных для буксировки или транспортировки, от ограничений (критических значений) на скорость ветра, которые, в свою очередь, зависят от степени инженерной подготовки буксируемого (транспортируемого) объекта. Непрерывная продолжительность окна погоды должна задаваться проектантами перехода, исходя из расстояния и скорости перехода. Если время перехода в период со значимой повторяемостью штормов превышает период времени, соответствующий заблаговременности достоверного прогноза штормовых условий, проектанты перехода должны предусмотреть пункты штормового отстоя на случай получения штормового предупреждения. Расположение пунктов должно быть выбрано так, чтобы из любой точки маршрута суда могли бы прийти до них за период времени, соответствующий заблаговременности достоверного прогноза штормовых условий. В случаях, когда это невозможно, необходимо принять меры к повышению скорости буксировки, повышению критических значений ограничивающих ветро-волновых условий или перенести начало операции на другой период времени.

Таким образом, построена имитационная модель штормов и окон погоды, для применения которой достаточно знать повторяемость штормовых условий. Изложенная модель позволяет генерировать временные ряды штормов и окон погоды, совокупность которых отражает характерные особенности ветрового режима, включая повторяемость штормов и функции распределения их количества и непрерывной продолжительности. Представляется, что модель может быть использована для любых акваторий океана, поскольку функции распределения числа штормов и их непрерывной продолжительности являются производными от повторяемости штормовых условий. Модель пригодна для расчета статистических характеристик окон погоды при планировании сложных морских транспортных операций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Матушевский Г. В., Надев В. В. Статистические закономерности распределения характеристик устойчивости ветрового волнения // Метеорология и гидрология. – 1987. – №9. С. 70–76.
2. Надев В. В. Имитационное моделирование рядов ветрового волнения для определения продолжительности штормовых циклов. В сборнике «Проблемы исследования и математического моделирования ветрового волнения» под общей редакцией И. Н. Давидана. – СПб.: Гидрометеоздат, 1995. – 432 с.
3. Рожков В. А., Лопатухин Л. И., Лавренов И. В., Дымов В. И., Бухановский А. В. Моделирование штормового волнения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2000, – Т. 36. – №5. – С. 689–699.
4. Мастрюков С. И. Имитационное моделирование статистических характеристик окон погоды в интересах планирования морских операций // Навигация и гидрография. – 1998. – №6. С. 84–89.
5. Лавренов И. В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. – СПб.: Гидрометеоздат, 1998. – 500 с.
6. Guide to wave analysis and forecasting observation [Electronic resource]. – Geneva: WMO, 1998. – No702 (Second edition). – 159 p. (Access conditions: <http://www.jcomm.info>)

---

**PROBABILISTIC MODEL OF STORMS AND GOOD WEATHER WINDOWS**

**S. I. Mastryukov**

*The approach to modeling the time series of storms and good weather windows, using the information about their recurrence rate is set forth. Based on the reanalysis results of wind in the Norwegian, Barents and White Seas for 1975–2002, the statistical relationships of the storms recurrence rate with the average values of the number of storms and their continuous duration, as well as the statistical relationships between the distribution functions of the number of storms and their continuous duration with average values of the number of storms and their continuous duration have been obtained. Using the revealed regularity as a basis, the probabilistic model that allows to generate the temporal sequence of storms and good weather windows, has been built. Verification of the model was carried out by calculation of the discrepancies between the set and model recurrence rate of the storm conditions for a total of 100 sets one month long. The model can be used to calculate the statistical characteristics of the good weather windows of the set continuous duration required when planning the complicated marine transport operations.*

УДК 551.465.432 (265.546–17)

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В  
БЕРИНГОВОМ ПРОЛИВЕ ПО ДАННЫМ АМЕРИКАНСКИХ И РОССИЙСКО-  
АМЕРИКАНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ 1992–2010 гг.**

**С. И. МАСТРЮКОВ**  
(ОАО «ГНИНГИ»)

*Проанализирована вертикальная структура течений и изменчивость температуры, солености и течений в придонном слое Берингова пролива на основе материалов американских и российско-американских исследований Берингова пролива за период с 1992 по 2010 годы. Выявлена тенденция увеличения скорости переноса тихоокеанских вод в Чукотское море и Северный Ледовитый океан, а также отсутствие значимой тенденции изменения температуры и солености глубинных вод в районе Берингова пролива. Оценена сезонная изменчивость гидрофизических условий.*

**Введение**

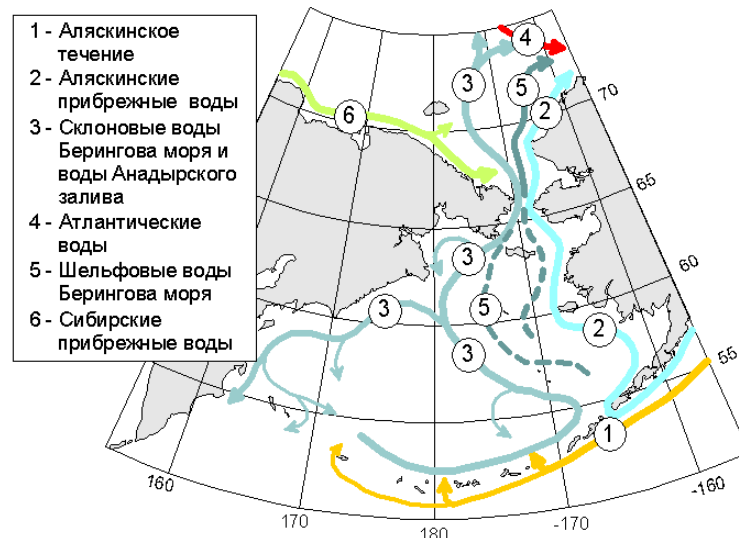
Через Берингов пролив проходят морские пути из Северной Европы и с восточного побережья Северной Америки на Дальний Восток и тихоокеанское побережье Северной Америки – Северный морской путь и Северо-западный проход (Northwest Passage), поэтому он является важным звеном глобальной морской транспортной системы.

Несмотря на небольшие размеры (ширина около 85 км и глубина около 50 метров) пролив является весьма важным элементом и глобальной климатической системы. Известно, что Берингов пролив в прошлом несколько раз мелел и закрывался, оставляя полосу суши между Чукоткой и Аляской. Это происходило в ледниковые периоды. Последний ледниковый период закончился примерно 11 тыс. лет назад. По одной из гипотез водообмен через Берингов пролив является одним из

механизмов глобального оледенения. Так, специалисты Национального центра атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research – NCAR) на основе численного моделирования предложили следующий механизм обратной связи [1]. В начале оледенения за счет понижения уровня Мирового океана Берингов пролив закрывается, вода из Тихого в Северный Ледовитый океан перестает поступать, и возрастает поступление туда теплой воды из Северной Атлантики. Постепенно за счет этого происходит таяние ледников и повышение уровня моря. Берингов пролив вновь открывается, начинается приток сравнительно холодных берингоморских вод, приток теплых вод из Северной Атлантики уменьшается. В результате происходит постепенное похолодание климата в высоких широтах, начинается оледенение, уровень моря понижается и Берингов пролив закрывается. Цикл, длящийся несколько тысяч лет, повторяется. Если описанный механизм действительно существует, то можно найти инструмент для управления этим циклом – регулирование водообмена через Берингов пролив.

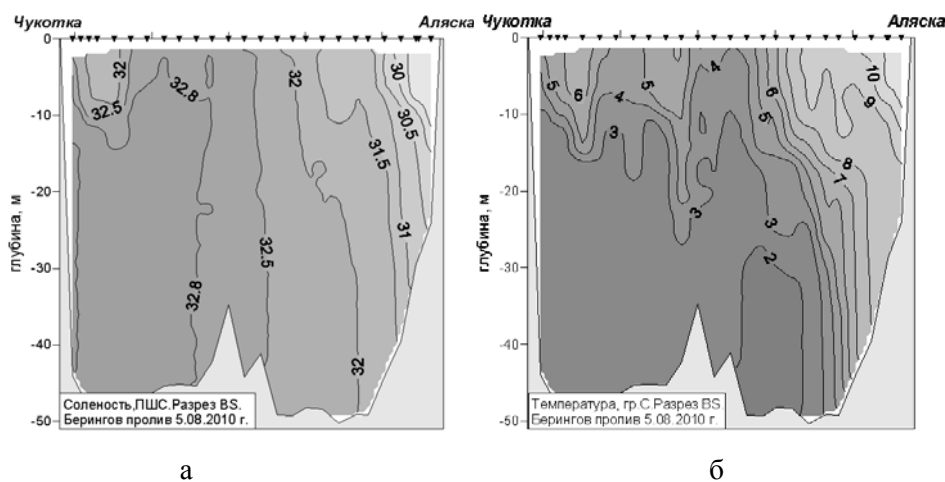
Результаты исторических океанологических исследований этого района обобщены в справочном пособии [2], среди подобных зарубежных работ необходимо выделить монографию [3]. В последние годы с появлением и бурным развитием новых средств океанологических измерений и наблюдаемыми процессами глобального изменения климата, интерес к изучению динамики и структуры вод в этом районе возрос [4, 5]. В настоящей работе выполнен анализ вертикальной структуры течений, а также многолетней и сезонной изменчивости гидрофизических условий в Беринговом проливе на основе данных современных натуральных исследований. Тема статьи имеет как научное, так и прикладное значение для заблаговременного информационного обеспечения различных видов морской деятельности, в том числе для мореплавания в Беринговом проливе.

На рис. 1 приведена генерализованная схема течений Берингова и Чукотского морей, основанная на работах российских [2] и американских [6, 7] специалистов.



**Рис. 1. Генерализованная схема постоянных течений в Беринговом и Чукотском морях**

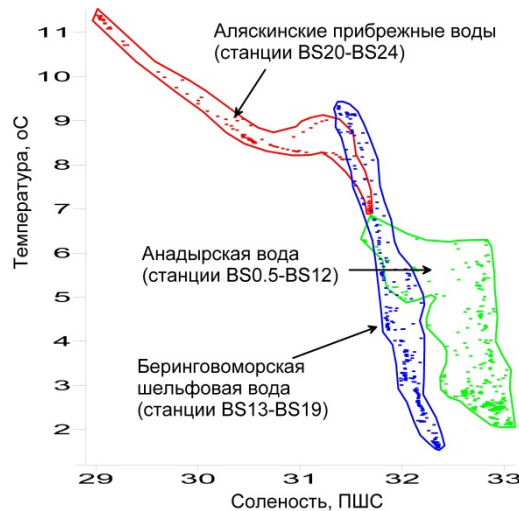
В глубоководной части Берингова моря наблюдается циклонический круговорот, образованный тихоокеанскими водами. Поток тихоокеанских вод, известный под названием течения Атту, входит в Берингово море между Алеутскими и Командорскими островами и движется на восток вдоль северного склона Алеутских островов и затем – на северо-восток вдоль материкового склона Берингова моря, образуя отдельные ветви и локальные круговороты. С юга и юго-востока к этому потоку через Алеутские проливы со стороны Тихого океана присоединяются ветви теплого Аляскинского течения (1). Течение, направленное вдоль северного склона Берингова моря на северо-запад (3), получило разные названия (Поперечное, Центрально-Берингоморское, Склоновое). Воды глубоководной котловины Берингова моря с этим течением проникают на северное мелководье моря южнее мыса Наварин и дают начало Наваринскому течению, и после перемешивания с водами Анадырского залива, через западный канал Берингова пролива выносятся в Чукотское море. Вдоль Аляскинского побережья Берингова моря распространяется распресненное прибрежными водами теплое Аляскинское прибрежное течение (2), которое вдоль берега Аляски через восточный канал Берингова пролива проникает в Чукотское море. В южной части Чукотского моря воды, выносимые Наваринским течением, смешиваются с прибрежными водами Сибирского шельфа (6). Достигая склона Чукотского моря эти воды, а также воды берингоморского шельфа (5) и Аляскинские прибрежные воды (2) взаимодействуют с водами атлантического происхождения (4). Описанную схему течений в Беринговом море хорошо иллюстрируют вертикальные разрезы температуры и солёности поперек Берингова пролива в августе 2010 г. (рис. 2).



**Рис. 2. Вертикальные разрезы температуры и солёности в Беринговом проливе 5.08.2010 г.**

При классификации водных масс, изложенной в работе [3], с помощью T-S анализа на разрезе (рис. 2) хорошо выделяются три водные массы: Аляскинская прибрежная с солёностью до 31,3‰ – в восточной части пролива, Анадырская прибрежная с солёностью свыше 32,8‰ – в западной части пролива, между которыми расположена Берингоморская шельфовая водная масса с солёностью около 32‰. Их более подробная характеристика представлена на рис. 3.

Через Берингов пролив в Чукотское море проникают воды Берингова моря, отличающиеся по своим характеристикам от Сибирской прибрежной водной массы, которая имеет соленость менее 30,5‰ и существенно холоднее вод поступающих из Берингова моря. На континентальном склоне Чукотского моря берингоморские воды взаимодействуют со значительно более теплыми и солеными атлантическими водами.



**Рис. 3. Огибающие температуры и солености для групп станций в Беринговом проливе 5.08.2010 г.**

Изменение потока берингоморских вод способно оказать влияние на изменение термохалинной структуры, теплового и ледового режима, баланса биогенных элементов вод, как Чукотского моря, так и Северного Ледовитого океана.

#### ***Характеристика использованных материалов***

Университет Вашингтона (Сиэтл, США) и Институт морских исследований Университета Аляски (США) с начала 90-х годов прошлого века приступили к интенсивным комплексным океанологическим исследованиям Берингова пролива и прилегающих к нему акваторий [8]. Исследования выполняются при финансовой поддержке Национального научного фонда (National Science Foundation – NSF), Министерства обороны США (Office of Naval Research –ONR) и Национальной администрации по океанам и атмосфере (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA). С 2004 г. к этим исследованиям подключилась Россия [9]. Исследования выполняются в рамках проекта «РУСАЛКА» (The Joint Russian-American Long-term Census of the Arctic – RUSALCA). С российской стороны исследования выполняются под эгидой Коммерческой Компании «Группа Альянс», между которой и ОАО «ГНИНГИ», с 2004 г. в работах на НИС «Профессор Хромов», «Север» и «Лаврентьев» принимали участие специалисты ОАО «ГНИНГИ», ДВНИИГМИ, ААНИИ и других российских мореведческих организаций. В настоящей работе в качестве исходных данных использованы размещенные на портале [8] данные океанологических измерений за 1992–2008 гг., а также материалы исследований за 2010 г., любезно предоставленные руководителями экспедиций по проекту «Русалка» В. М. Смолиным и В. Ю. Бахмутовым.

Берингов пролив разделен островами Диомида на две части – западную и восточную. Схема расположения автономных буйковых станций (АБС) приведена на рис. 4, там же приведена схема основных гидрологических разрезов по проекту «Русалка». В центре западной части пролива расположена основная АБС А1-1, в центре восточной части пролива расположена АБС А2. Третья основная АБС А3 расположена примерно в 60 км к северу от островов Диомида.

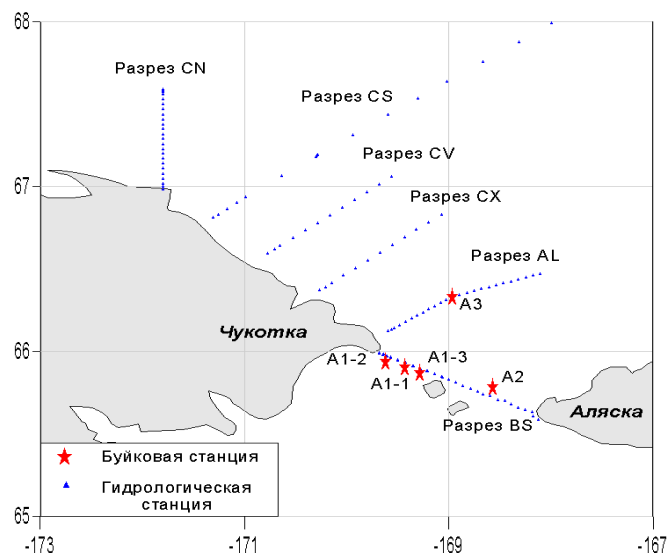


Рис. 4. Расположение АБС и основных гидрологических разрезов по проекту «Русалка»

Использование притопленных АБС позволило выполнять круглогодичные измерения, несмотря на наличие ледяного покрова. В ходе исследований в качестве измерителей электропроводности и температуры на АБС использовались измерители производства фирмы Sea Bird Electronics – ISCAT (SBE-37IM), Microcat (SBE-37SM) и SeaCat (SBE-16plus). Для измерения течений использовались механические и акустические измерители течений норвежской компании AANDERAA INSTRUMENTS RCM7, RCM9, RCM11, а также акустические профилографы течений ADCP фирмы «RD Instruments» (США). Дискретность использованных данных измерений лежала в пределах от 20 минут до 1 часа. Все технические средства были сертифицированы и поверены. Общая характеристика использованных данных приведена в табл. 1.

Таким образом, по трем точкам в придонном слое района имеются данные практически непрерывных наблюдений продолжительностью от 6 до 15 лет. Несмотря на пропуски в отдельные годы, по продолжительности и представительности рассматриваемые данные следует признать уникальными.

Для оценки представительности результатов наблюдений выполнен статистический анализ невязок измерений различными приборами. Выполненные расчеты коэффициентов корреляции, средней и среднеквадратической невязки между рядами данных с различными масштабами временного осреднения свидетельствуют об однородности данных полученных разными приборами и их пригодности для целей оценки тенденций изменения режима. Из всех материалов были забракованы

только данные наблюдений за температурой прибором RCM4 (сер. номер 6543) на АБС А2 в сезон 1993–1994 гг., так как измеренная температура в отдельные сроки была ниже температуры замерзания.

Таблица 1

## Количество измерений приборами разных типов, использованных при обработке

Период, гг.	Станция А1-1			Станция А2			Станция А3		
	<i>T, S</i> (SBE)	Теч., <i>T</i> (RCM)	Теч. (ADCP)	<i>T, S</i> (SBE)	Теч., <i>T</i> (RCM)	Теч. (ADCP)	<i>T, S</i> (SBE)	Теч., <i>T</i> (RCM)	Теч. (ADCP)
1992–1993	8764	8761			8763				
1993–1994	8772	8769		17555	8776				
1994–1995				16838	8417				
1995–1996				8611	8611				
1996–1997									
1997–1998				8668	4333		8669	4335	
1998–1999				17650			20472	6956	
1999–2000				9838	9836		9829	9824	
2000–2001				6956	8931		17862	8930	
2001–2002				6957	6854		6959	6958	
2002–2003				17912	8952		8942	8942	
2003–2004				7453	10186		20406	10203	
2004–2005	8822	8579		15399	7697		7686	7686	
2005–2006	35392	8849		8707	18557		8711		
2006–2007	35415	8841	159123	9871	9878			9877	
2007–2008	77380			7997		115283	38682		115972
2008–2009	30708		91894	15404		92212	30932		92178
2009–2010	32626	8156							

Глубина, на которой выполнялись контактные измерения на АБС лежала в пределах от 36 до 50 м, преимущественно наблюдения выполнялись в 10 м от дна. Глубже 25 м в рассматриваемом районе вертикальные градиенты температуры весьма малы и изменения температуры и солёности за счет разной глубины постановки приборов в придонном слое не превышают долей процента.

Указанные обстоятельства позволили сформировать однородные ряды многолетних наблюдений течений, температуры и солёности в придонном слое Берингова пролива, а также двухлетние ряды скорости и направления течений в толще вод Берингова пролива для последующего статистического анализа.

**Сезонная изменчивость течений**

Для оценки сезонной изменчивости течений в качестве исходных данных использованы материалы измерений акустическим профиломером течений ADCP. На рис. 5 в качестве примера приведены результаты регистрации течений на АБС А1-1 с осреднением 1 сутки в западной части Берингова пролива в сезон 2006–2007 гг.

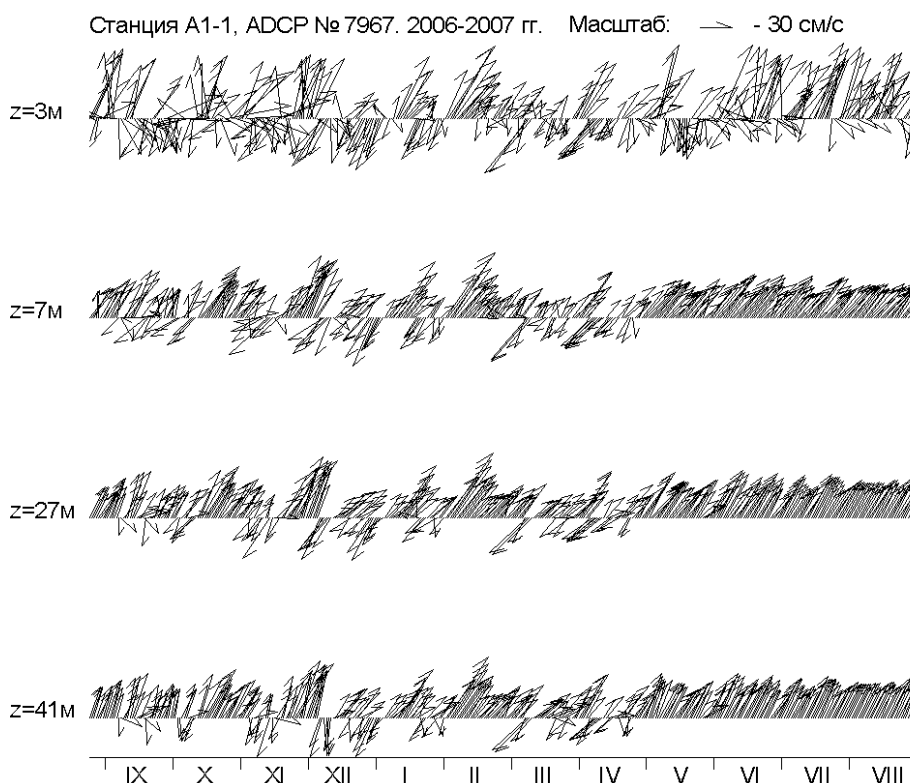


Рис. 5. Пример регистрации течений прибором ADCP в сезон 2006–2007 гг.

Анализ вертикальной структуры течений позволил выявить высокую когерентность и устойчивость течений в толще воды. Коэффициент корреляция между меридиональными компонентами скорости течения в придонном слое и вышележащих слоях превышает 0,95 вплоть до горизонта 8 м. Это обстоятельство позволяет считать результаты наблюдений в придонном слое представительными практически для всей толщи воды и тем самым по наблюдениям в придонном слое получать оценки многолетней изменчивости переноса воды через Берингов пролив.

На рис. 6 приведены графики среднемесячных векторов суммарного переноса воды за период с 2006 по 2009 гг. на трех АБС. Там же приведены значения среднегодовых значений модуля ( $W$ ) и направления ( $Dir$ ) переноса. Как видим, глубже 10 м скорости переноса в Беринговом проливе составляют 30–35 см/с, при этом в западной части Берингова пролива средние скорости переноса на 2–3 см/с ниже, чем в восточной части, что вряд ли связано с разными периодами измерений (табл. 1). В западной части пролива среднегодовое направление переноса практически во всей толще равно 25 градусам, в восточной части пролива направление переноса – 13 градусам. На выходе из Берингова пролива на АБС А3 течения с ССВ – С разворачиваются на ССЗ и скорость переноса на глубинах свыше 10 м снижается до 27 см/с. В поверхностном слое средняя скорость суммарного переноса меньше, чем на глубинах свыше 10 м. Летом поток воды в северном направлении по сравнению с зимним периодом в целом увеличивается, что, видимо, вызвано перестройкой барического поля.



Среднегодовая скорость среднего по толще воды суммарного переноса вод в сезоны 2006, 2008 гг. в западной части Берингова пролива составила 31 см/с, в восточной части пролива в сезоны 2007, 2008 гг. – 33 см/с, в месте расположения АБС А3 в сезоны 2007, 2008 гг. – 26 см/с.

Полученные оценки косвенно подтверждаются анализом взаимной корреляции рядов температуры на АБС. Расчет взаимной корреляционной функции между рядами среднесуточной температуры воды в придонном слое на АБС А1-1 и А3 с разными задержками времени показывает, что ее максимум отмечается при задержке в 40 часов. Это означает, что возмущения из точки А1-1 в точку А3 перемещаются со средней скоростью 35 см/с.

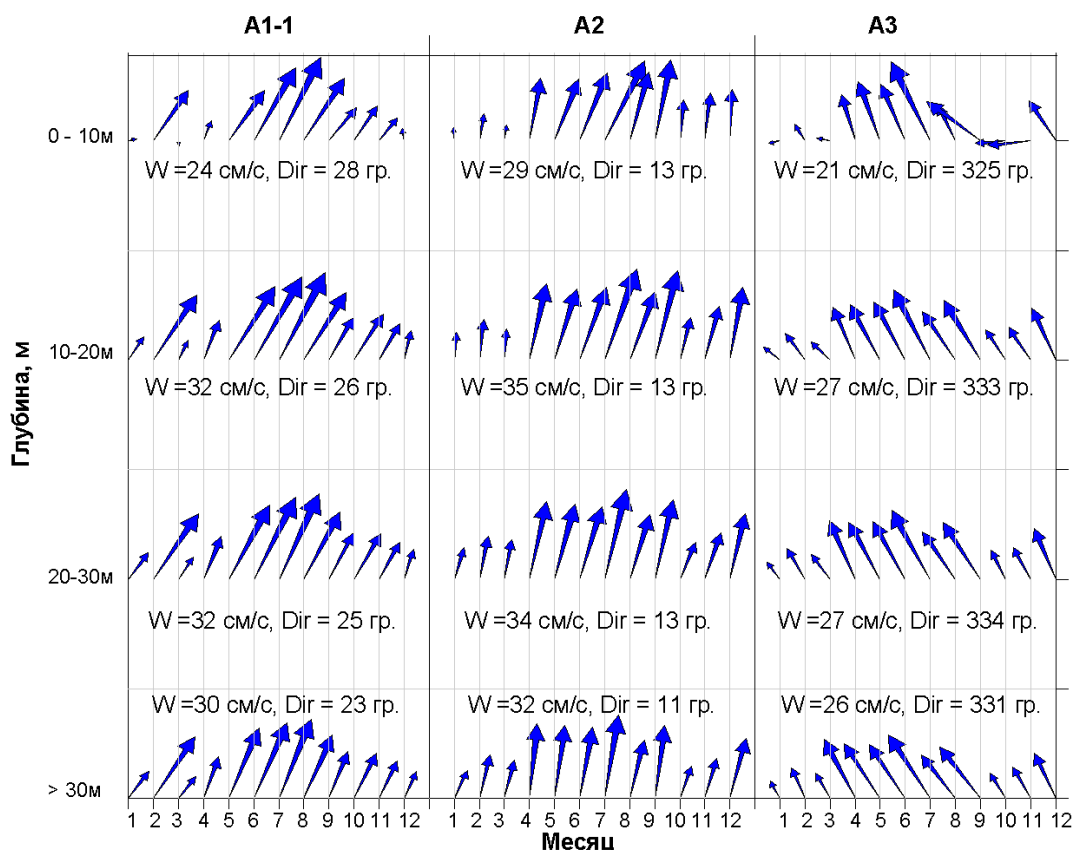


Рис. 6. Графики сезонного хода среднемесячных векторов суммарного переноса за период с 2006 по 2009 гг. (см. табл. 1)

Следует подчеркнуть, что средняя скорость суммарного переноса всегда несколько меньше средней скорости течения, поскольку первая определяется путем сложения векторов, а вторая путем осреднения модулей скорости течения. Скорость суммарного переноса представляет интерес при исследованиях климатического характера, а средняя скорость течения важна для решения ряда прикладных задач. Ниже дана оценка режима течений в навигационном слое толщиной 10 м в Беринговом проливе.

На рис. 7 приведены диаграммы повторяемости течений по 16 румбам. В западной части Берингова пролива преобладают течения ССВ и СВ направления, повторяемость которых в летний период достигает 67%, а зимой снижается до 43%. В восточной части пролива в навигационном слое преобладают течения ССВ и С направлений, суммарная повторяемость которых в летний период достигает 81%, а зимой снижается до 50%. На АБС А3 преобладают течения ССЗ и СЗ направления, их повторяемость летом достигает 64%, а зимой снижается до 40%.

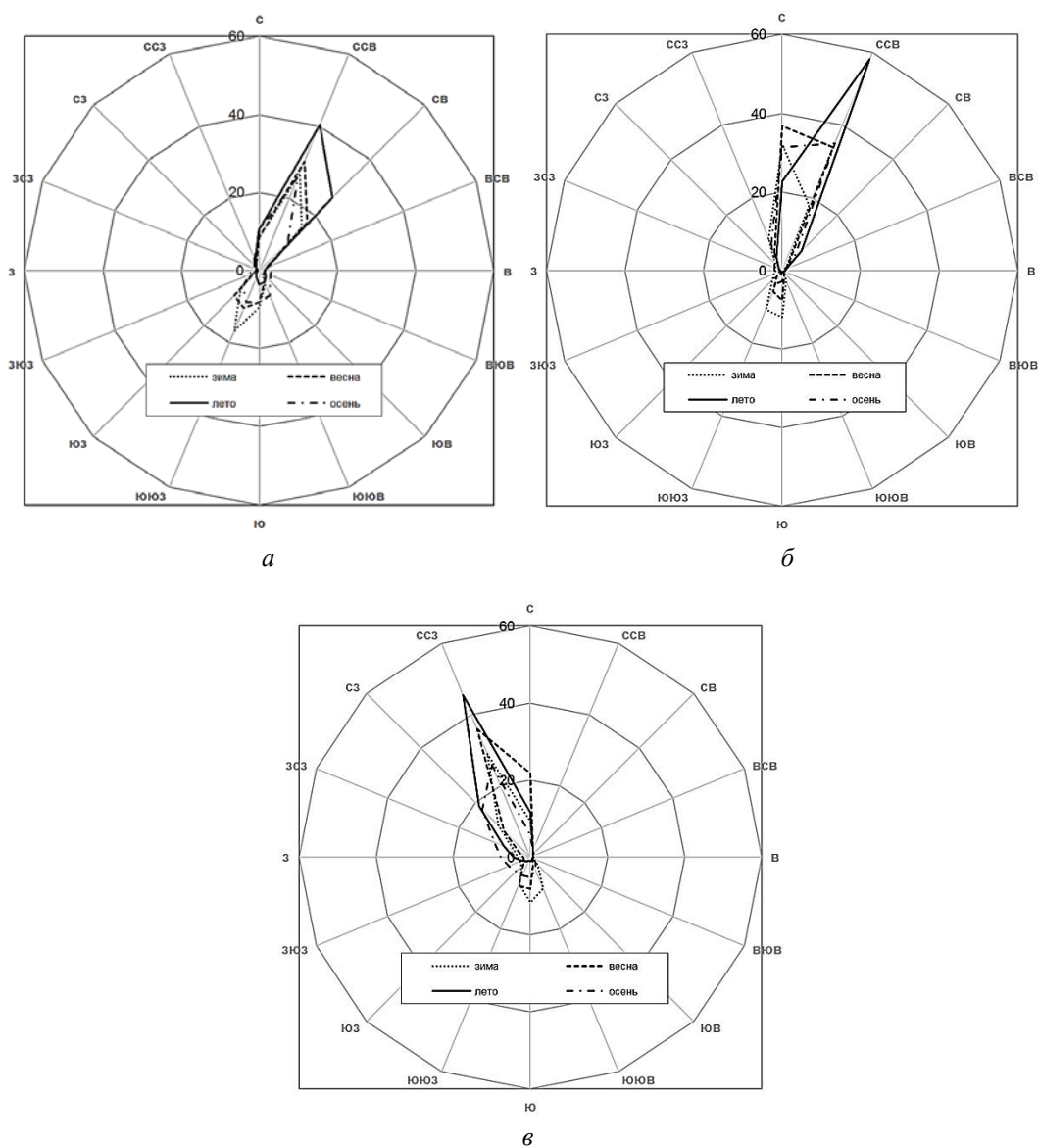
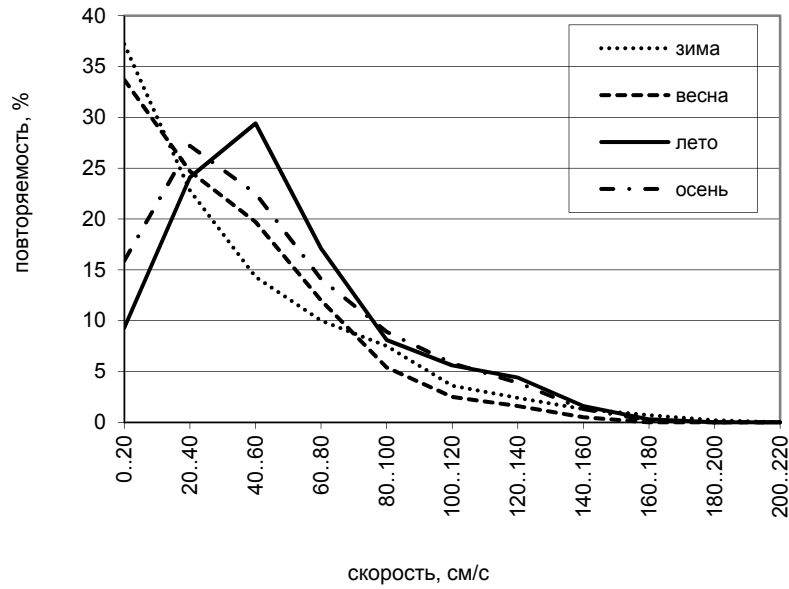
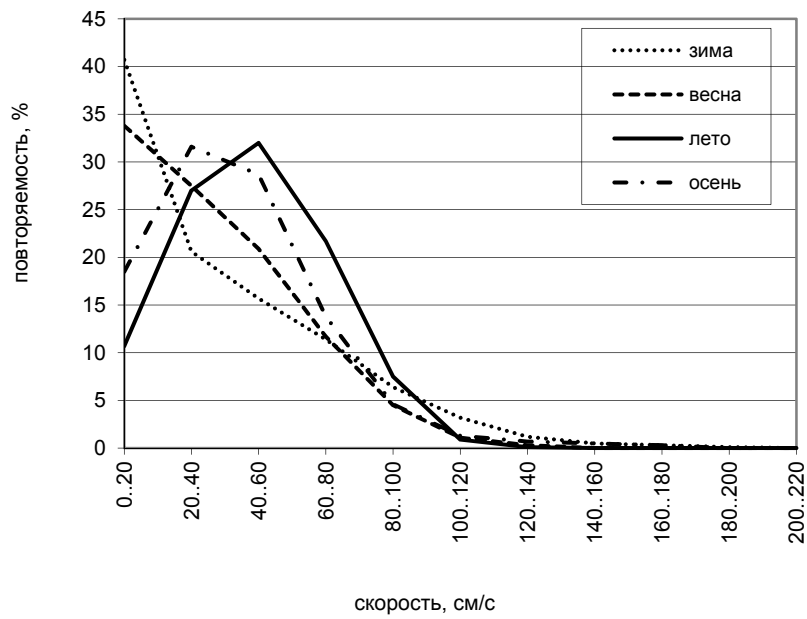


Рис. 7. Повторяемость течений по направлениям в навигационном слое (0–10 м) на АБС А1-1 (а), А2 (б), А3 (в) в центральные месяцы сезонов

Графики сезонной повторяемости течений по градациям скорости приведены на рис. 8.



а



б

Рис. 8. Повторяемость течений по градациям скорости в навигационном слое (0–10 м) на АБС А1-1 (а), А2 (б) по сезонам года

Среднегодовая скорость течений в навигационном слое на АБС А1-1 в период 2008–2009 гг. составила 42 см/с, на А2 – 40 см/с, на А3 – 30 см/с. Летом и в декабре средняя скорость течений выше, чем в другие периоды и достигает в Беринговом проливе 55–60 см/с. Максимальные скорости течения с вероятностью непревышения 99,99% в навигационном слое по данным ADCP за два календарных года измерений с дискретностью 20–30 минут на АБС А1-1 достигают 190 см/с, на А2 – 210 см/с, на А3 – 130 см/с.

**Сезонная изменчивость температуры и солености**

Сезонные изменения свойств водных масс в Беринговом проливе связаны в основном с сезонными колебаниями поступления пресной воды в бассейн Берингова моря и сезонными колебаниями составляющих радиационного баланса.

На рис. 9 приведен сезонный ход температуры воды в придонном слое Берингова пролива. Расчеты выполнены по данным описанным выше (табл. 1). Средняя глубина измерений на АБС А1 составила 40 м, на А2 – 46 м, на А3 – 48 м.

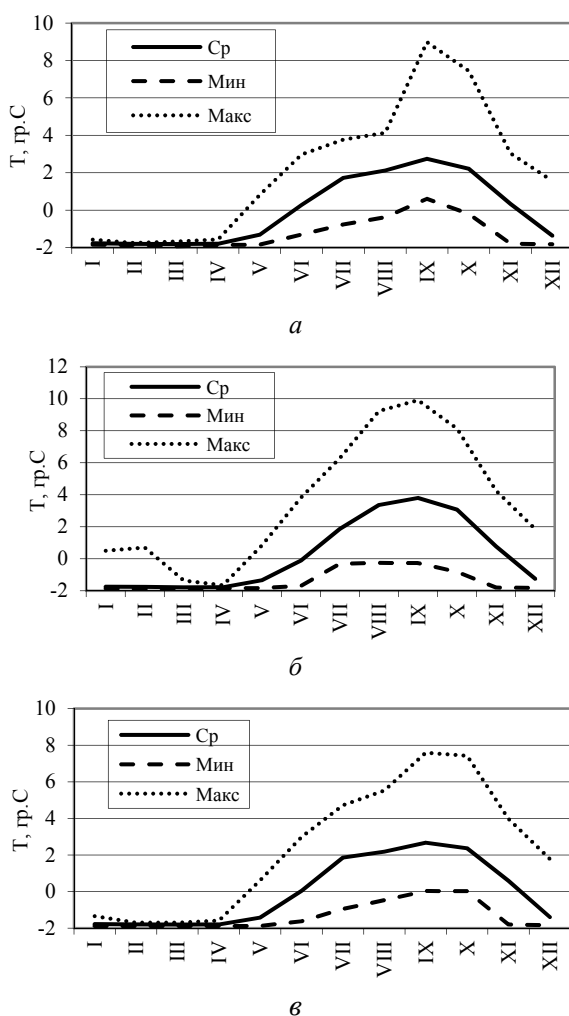


Рис. 9. Сезонный ход средней, минимальной и максимальной температуры в придонном слое на АБС А1-1 (а), А2 (б), А3 (в)

Максимум средней температуры отмечается обычно в сентябре, минимум – в январе-апреле. Амплитуда годового хода средней температуры воды в придонном слое на АБС А1 составляет 4,6°С, на А2 – 5,6°С, на А3 – 4,5°С. Абсолютные максимумы температуры отмечаются в сентябре и лежат в пределах от 7,5 (А3) до 10°С (А2). Средняя годовая температура воды в придонном слое в западной части пролива на 0,26°С ниже, чем в восточной части пролива, а в период максимального прогрева (сентябрь) – на 1,5°С.

Сезонный ход солености воды (S) в придонном слое Берингова пролива приведен на рис. 10.

Максимум средней солености отмечается обычно в апреле, минимум – в декабре. Амплитуда годового хода средней солености воды в придонном слое на всех АБС составляет 1,8‰. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что на АБС А3 абсолютный максимум солености ниже, чем на А1-1 и А2, что свидетельствует о поступлении в район АБС А3 соленых вод только из Берингова моря.

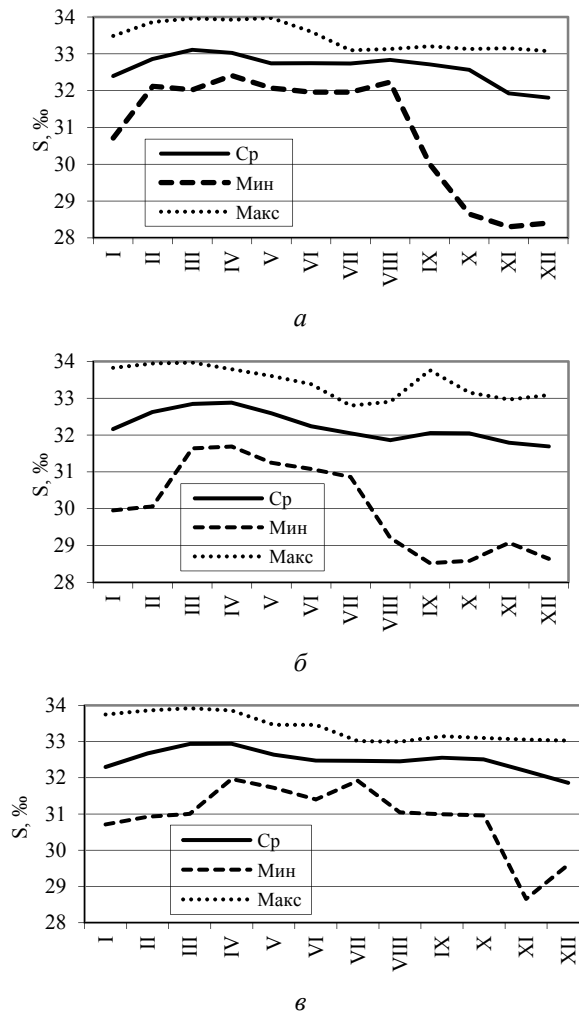
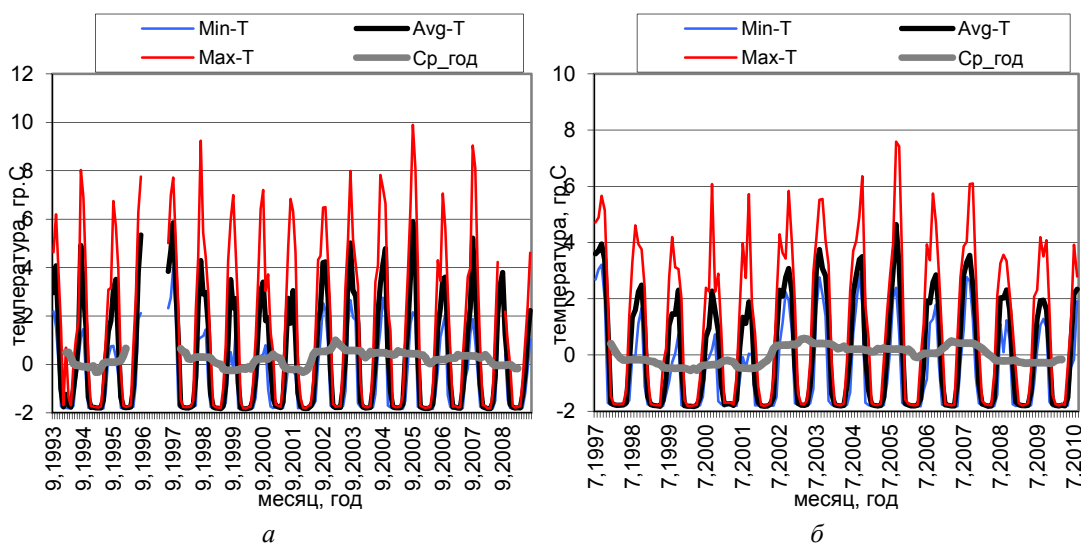


Рис. 10. Сезонный ход средней, минимальной и максимальной солености воды в придонном слое на АБС А1-1 (а), А2 (б), А3 (в)

*Современные тенденции многолетней изменчивости гидрофизических условий*

Наиболее продолжительные наблюдения за температурой и соленостью выполнены на АБС А2 и А3. В качестве примера на рис. 11 приведен многолетний ход среднемесячных (Avg), среднегодовых (Cp\_год) и экстремальных (Min, Max) температур ( $T$ ) на этих АБС.



**Рис. 11. Многолетний ход температуры воды в придонном слое на АБС А2(а) и А3 (б)**

Амплитуда межгодовой изменчивости среднегодовых температур в придонном слое на АБС А3 за 1993–2009 гг. составила  $1,1^{\circ}\text{C}$  при среднегодовой температуре  $0,04^{\circ}\text{C}$ . Амплитуда межгодовой изменчивости среднегодовых температур в придонном слое на АБС А2 за 1992–2009 гг. составила  $1,3^{\circ}\text{C}$  при среднегодовой температуре  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Амплитуда межгодовой изменчивости среднегодовых значений солености на АБС А3 за 1993–2009 гг. составила  $0,7\text{‰}$ , при среднегодовой солености  $32,5\text{‰}$ . Амплитуда межгодовой изменчивости среднегодовых температур в придонном слое на АБС А2 за 1992–2009 гг. составила  $0,8\text{‰}$ . при среднегодовой солености  $32,2\text{‰}$ . Анализ многолетних рядов температуры и солености в придонном слое на всех АБС общей продолжительностью от 9 (А1) до 15 (А2) лет не позволил выявить сколь-нибудь статистически значимого тренда. Диапазон многолетней изменчивости средних и экстремальных значений также не испытал за этот период значимых изменений.

Графики многолетнего хода среднемесячных (Avg), среднегодовых (Cp\_год) и экстремальных (Min, Max) значений составляющих течения на параллель ( $U$ ) и меридиан ( $V$ ) на АБС А2 и А3 в придонном слое приведены на рис. 12, там же приведен график линейного тренда (Линейный) средней скорости меридиональной компоненты переноса.

На АБС А2, А3 за период измерений выявлена статистически значимая тенденция увеличения меридиональной компоненты скорости течения. За период с июля 1997 по август 2009 гг. скорость увеличения скорости переноса на АБС А2 составила около  $0,8\text{ см/с}$  в год, а на АБС А3 около  $0,4\text{ см/с}$  в год.

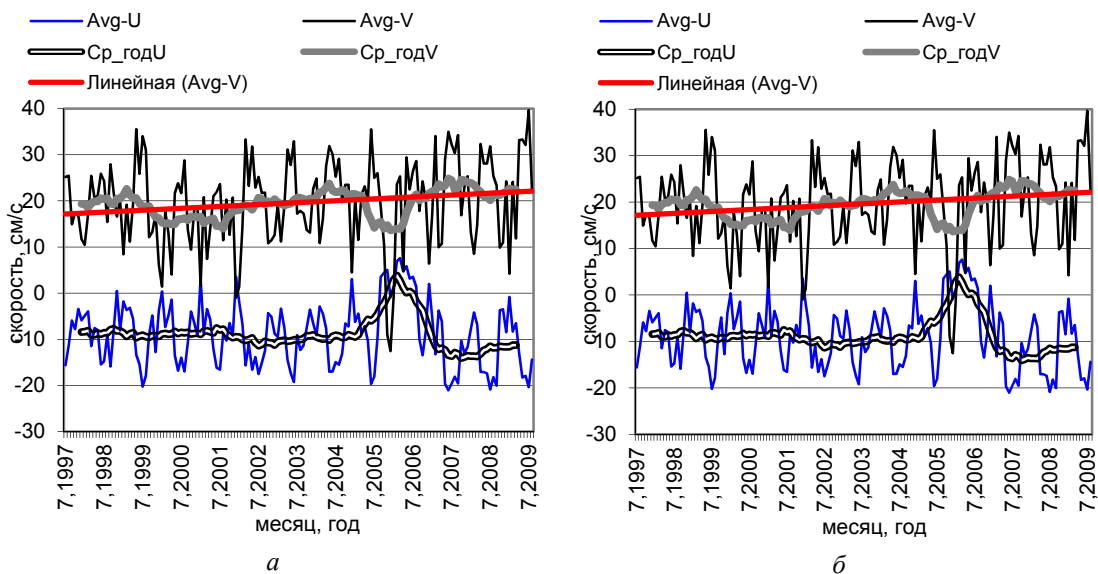


Рис. 12. Многолетний ход составляющих скорости течения в придонном слое на АБС А2 (а) и А3 (б)

Таким образом, за последние 12 лет скорость переноса водных масс в Беринговом проливе на АБС А2 возросла на 9 см/с, а на АБС А3 – на 5 см/с. Следует отметить, что достаточно устойчивый перенос вод из Чукотского моря в Берингово происходит очень редко. За последние 12 лет среднемесячный перенос воды в Беринговом проливе только в ноябре и декабре 2005 г. был отрицательным, т. е. поток воды был направлен из Чукотского моря в Берингово.

#### Заключение

Проведенный анализ данных многолетних практически непрерывных инструментальных измерений течений, температуры и солёности воды в придонном слое Берингова пролива, а также измерений вертикальной структуры течений, полученных в результате американских и совместных российско-американских исследований с 1992 по 2010 гг. позволил существенно уточнить имеющиеся представления о гидрологическом режиме Берингова пролива.

Выявлена высокая однородность поля течений в толще вод Берингова пролива (от 8 м от поверхности до 10 м от дна). Получены представительные оценки режима течений в навигационном слое, что важно для информационной поддержки мореплавания в этом районе, а также уточнен режим температуры и солёности в придонном слое Берингова пролива. Выявлена значимая сезонная изменчивость гидрофизических условий.

Для целей климатических исследований важным являются результаты оценки крупномасштабной изменчивости гидрофизических условий. Выявлено, что в период с 1997 по 2009 гг. средняя скорость переноса водных масс в Беринговом проливе на АБС А2 возросла на 9 см/с. Это означает, что приток берингоморских вод в Чукотское море за последние 12 лет возрос практически на треть, и, в свою очередь, свидетельствует о возрастании влияния берингоморских вод на режим Чукотского моря и Северного Ледовитого океана. На АБС А3 прирост средней скорости потока

берингоморских вод за этот же период составил около 5 см/с (25%). Анализ многолетних рядов температуры и солености общей продолжительностью до 15 лет в придонном слое на всех АБС не позволил выявить статистически значимого тренда. Диапазон многолетней изменчивости средних и экстремальных значений так же не испытал за этот период существенных изменений. Увеличение притока вод Берингова моря в Северный Ледовитый океан может привести к снижению притока теплых вод атлантического происхождения, что по одной из современных гипотез [1] может привести к началу оледенения.

Важно продолжать исследования в этом ключевом районе Мирового океана и детально исследовать многолетнюю изменчивость потока вод атлантического происхождения в Северный Ледовитый океан.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hu A., Meehl G. A., Otto-Bliesner B., Waelbroeck C., Han W. Influence of Bering Strait flow and North Atlantic circulation on glacial sea-level changes. // Nature Geoscience, 2010, 3, P. 118–121. URL <https://www2.ucar.edu/news/1243/bering-strait-influenced-ice-age-climate-patterns-worldwide>.
2. Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том X. Берингово море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. // Под ред. Ф. С. Терзиева и др. – СПб: Гидрометеоиздат, 1999. – 300 с.
3. Коучмен Л. К., Огорд К., Трип. Р. Б. Берингов пролив. Региональная физическая океанография. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 199 с.
4. Woodgate R. A., Aagaard K., Weingartner T. J. Monthly temperature, salinity and transport variability of the Bering strait throughflow. Geophys. // Res. Lett. – 2005. – Vol. 32. – No. 4, L04601. URL <http://psc.apl.washington.edu/HLD/Bstrait/bstrait.html>.
5. Woodgate R. A., Aagaard K., Weingartner T. J. Interannual changes in the Bering Strait fluxes of volume, heat and freshwater between 1991 and 2004. // Geophysical Research Letters. – 2006. – Vol. 33. – L15609. URL <http://psc.apl.washington.edu/HLD/Bstrait/bstrait.html>.
6. Danielson S., Aagaard K., Weingartner T., Martin S., Winsor P., Gawarkiewicz G., and Quadfasel D., The St. Lawrence polynya and the Bering shelf circulation: New observations that test the models // J. Geophys. Res., J111, C09023, doi:10.1029/2005JC003268, 2006.
7. Weingartner T., Aagaard K., Woodgate R., Danielson S., Sasaki Y., Cavalieri D. Circulation on the North Central Chukchi Sea Shelf // Deep-Sea Res., Pt II, 52(24–26). 3150–3174. – 2005.
8. Портал «High Latitude Dynamics» Университета Вашингтона. URL <http://psc.apl.washington.edu/HLD/Bstrait/Data/BeringStraitCruiseDataArchive.html>.
9. Алексеев С. П. Российско-американские исследования в Беринговом и Чукотском морях – одно из приоритетных направлений деятельности ГНИНГИ МО РФ в 2006 г. // Навигация и гидрография, 2006, №23. – С. 9–16.

#### ***EVALUATION OF VARIABILITY OF HYDROPHYSICAL CONDITIONS IN THE BERING STRAIT BASED ON THE DATA OF THE AMERICAN AND RUSSIAN-AMERICAN EXPLORATIONS IN 1992–2010***

**S. I. Mastryukov** («GNINGI» OJSC)

*The vertical structure of currents and variability of temperature, salinity and currents in the near-bottom layer of the Bering Strait, based on the materials of the American and Russian-American explorations of the Bering Strait in 1992–2010 are analysed. The tendency to increase the transport speed of the Pacific waters to the Chuckchee Sea and the Arctic Ocean and the absence of the significant tendency to change the temperature and salinity of the deep waters in the area of the Bering Strait have been revealed. The seasonal variability of hydrophysical conditions has been evaluated.*



УДК 551.466.88

**ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМОХАЛИННОЙ  
СТРУКТУРЫ БАРЕНЦЕВА МОРЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВНУТРЕННИХ  
ПРИЛИВНЫХ ВОЛН**

**С. М. ГОРДЕЕВА (РГГМУ),  
А. С. САФРАЙ (ИО РАН),  
И. В. ТКАЧЕНКО (СПбГМТУ)**

*В результате численных экспериментов с трехмерной негидростатической моделью юго-западного района Баренцева моря выяснено, что при климатическом сценарии с повышением температуры поверхности и усилением затока атлантических вод вследствие обострения пикноклина и его опускания происходит генерация большого числа мод внутренних волн и увеличение их амплитуд, что увеличивает диапикническое перемешивание в районе пикноклина.*

*При имитации уменьшения атлантического затока волнообразование на пикноклине мало отличается от среднеклиматического, а вблизи дна вследствие уменьшения вертикальных градиентов плотности внутренние приливные волны мало выражены, но при приближении к неоднородностям дна, образуют слабые, но значительные по высоте аномалии плотности.*

**Введение.** Внутренние приливные волны (ВПВ) – постоянный источник диапикнического перемешивания в окраинных морях Арктики, где амплитуды приливов велики. Особое значение этот механизм приобретает в юго-западном районе Баренцева моря, куда происходит постоянный заток Атлантических вод. В осенний период, когда пикноклин выражен особенно сильно, вследствие близости неровностей дна и малых глубин, спектр приливных внутренних волн особенно широк и, соответственно, диссипация приливной энергии и перемешивание происходят, в том числе, на достаточно больших частотах.

В связи с тем, что интенсивность ВПВ прежде всего определяется градиентом пикноклина и его удалённостью ото дна, климатические изменения, происходящие в последние десятилетия, могут привести к значительной перестройке пространственной структуры внутренних волн, что, в свою очередь, изменит условия и безопасность подводного мореплавания. В статье будут представлены оценки интенсивности этого процесса, полученные в результате численных экспериментов с региональной моделью юго-западной части Баренцева моря.

**Постановка задачи.** Межгодовой ход глобальной приповерхностной температуры воздуха, систематизированный в Четвертом оценочном отчете Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [1] и основанный на глобальных архивах гидрометеорологической информации, свидетельствует о постепенном её росте в течение всего периода инструментальных наблюдений. Одновременно с этим увеличивается теплосодержание океана, что,

прежде всего, определяется нагреванием его верхней толщи от 0 до 700 м. В целом с 1961 по 2003 гг. теплосодержание выросло на  $8,11 \pm 0,74 \times 10^{22}$  Дж, что соответствует среднему потеплению на 0,1 [1].

Кроме того, в последние 30 лет отмечались значительные климатические изменения в Арктическом бассейне Северного Ледовитого океана [2]. В период 1989–1993 гг. произошло значительное увеличение температуры атлантических вод. В конце 1990-х годов наметилась определенная стабилизация поступления атлантических вод в Арктический бассейн. Однако, начиная с 2003–2004 гг., температура атлантических вод в Евразийском суббассейне начала повышаться до величин, ранее никогда здесь не наблюдававшихся. Последовавшее за этим лето 2007 г. привело к невиданным по масштабам изменениям распределения ледяного покрова, термохалинной структуры поверхностного слоя океана и теплового состояния атлантических вод в Северном Ледовитом океане.

В соответствии с этими наблюдениями был определен *первый* сценарий изменений термохалинной структуры вод в Баренцевом море. Он характеризовался повышением температуры океана и *усилением* залива атлантических вод в Мурманском течении, т. е. увеличение солёности в соответствии с текущим трендом.

С другой стороны, циркуляция вод в Северной Атлантике крайне нестабильна, и в течение последних нескольких лет обсуждаются прогнозы её значительного ослабления и даже остановки [3, 4]. В связи с этим был рассмотрен *второй* сценарий изменений термохалинной структуры вод в Баренцевом море: повышение температуры океана в соответствии с настоящим трендом и *ослабление* ветви Мурманского течения.

В качестве контрольного было принято состояние термохалинной структуры на сентябрь 1990 г. Тренды температуры и солёности оценивались на основании наблюдений на Кольском меридиане [5], находящемся в непосредственной близости от исследуемого района, и определялись за период с 1990 по 2010 г., как показано на рис. 1.

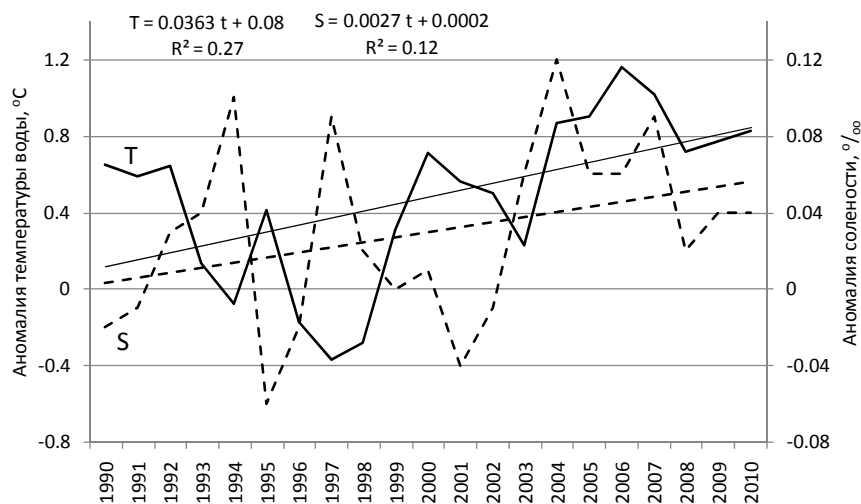


Рис. 1. Аномалии температуры воды и солёности в слое 0–200 м на Кольском меридиане, станции 3–7, относительно нормы 1971–2000 гг. [5] и их линейные тренды

Таким образом, за последний 21 год в верхнем 200-метровом слое температура воды увеличилась на  $0,4^{\circ}\text{C}$ , а солёность – на  $0,03\text{‰}$ .

Эти оценки прироста температуры и солёности были выбраны для расчетов по первому сценарию. Общий прирост был распределен по глубине пропорционально величине локальной аномалии (отклонение от среднего по глубине значения), так что на поверхности моря, где локальные аномалии велики, прирост температуры был выше, чем на глубине. Аналогично распределялся прирост солёности: в стрежне Мурманского течения около горизонта 100 м прирост солёности больше, чем на поверхности и глубине.

Для второго сценария рассчитанный прирост солёности учитывался с обратным знаком, так что стрежень соленого течения ослаблялся больше, чем на поверхности и в придонном слое.

Для исследования изменений интенсивности внутренних приливов в случае первого и второго сценария были проведены численные эксперименты с трехмерной негидростатической моделью для юго-западного района Баренцева моря. Сравнивались численные решения за сентябрь 1990 и 2010 гг. Выбор сентября объясняется максимальной интенсивностью внутриволновой приливной динамики в этот период года [6].

Кратко напомним основные характеристики модели [6].

**Уравнения модели.** Для численного моделирования внутри волновой динамики используется трехмерная негидростатическая модель, включающая в себя осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, уравнение неразрывности, сконструированного из них трехмерного уравнения Пуассона для расчёта давления. При этом в модели давление разделяется на гидростатическое и негидростатическое. Модель включает в себя также уравнения статики, переноса температуры и солёности. Для замыкания модели используется k-eps модель типа Канты-Клайсон. С её помощью рассчитываются коэффициенты вертикальной диффузии в уравнениях движения модели, а также числа Прандтля для расчёта вертикальной диффузии тепла и соли. Коэффициенты горизонтальной диффузии вычисляются на каждом шаге по времени согласно параметризации Смагоринского.

**Численная схема и сетка.** Численная задача решалась методом конечных элементов (кэ) на тетраэдрах, что обеспечило полную трёхмерность и позволило сгущать сетку в районах морфологических особенностей дна и берега. Область решения разбита на 3647617 кэ. По вертикали используется «растянутая» к поверхности Z-координата (с введением соответствующих метрических множителей в уравнения модели) с тем, чтобы максимальное сгущение приходилось на зону, где вероятность генерации внутренних волн максимальна. Максимальное разрешение по горизонтали – 5 км, минимальное – 200 метров. По вертикали разрешение меняется от 5 до 20 метров. Интегрирование по времени осуществлялось методом Рунге-Кутты. Численная схема имеет 2-ой порядок точности, как по пространству, так и по времени.

**Граничные условия.** На дне применялось граничное условие прилипания. На поверхности задавалось условие твёрдой крышки. На всех четырёх вертикальных границах области задавались горизонтальные векторы скорости [7]. При этом чтобы избежать отражения внутренних волн на этих открытых границах, основные

эксперименты были проведены с использованием условия излучения Орланского, которое вносило наименьшие искажения в численное решение.

Наиболее эффективным для выбора временного шага при интегрировании уравнений оказалось задание «движущегося дна» – приём, часто используемый при моделировании (как численном, так и лабораторном) внутренних волн. Правда, в этом случае вынуждающий прилив имеет одинаковый эллипс для всех точек выбранной области, но учитывая её малость в данном эксперименте, а также относительно небольшую вариацию (не более 3%) амплитуды приливной скорости и практически неизменное положение осей эллипса на границах, вносимые искажения незначительны.

Для уравнений переноса температуры, солёности, турбулентной кинетической энергии и скорости её диссипации на открытых границах также использовалось условие излучения, а на остальных – равенство нулю потока соответствующей переменной модели.

**Начальные условия.** В качестве начальных условий выбирались векторное поле скорости из решения баротропной задачи для Северного Ледовитого океана на пятикилометровой сетке с использованием ассимиляции для корректировки решения по данным наблюдений [7], а также поля температуры и солёности из решения модели NOPY-G [8] для сентября 1990 года. Выбор начальных условий для предложенных сценариев описан выше.

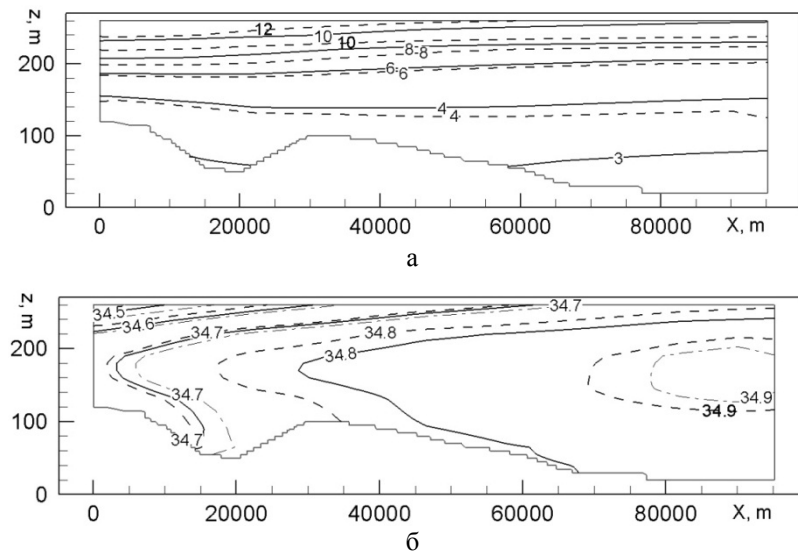
**Район исследования.** Для исследования был выбран район с координатами  $33^{\circ}20'$ – $34^{\circ}40'$  восточной долготы и  $69^{\circ}30'$ – $70^{\circ}20'$  северной широты в юго-западной части Баренцева моря. Выбор района определялся, исходя из данных батиметрии. Была использована карта глубин из архива ИВСАО [9] с одноминутным разрешением. Известно, что генерация внутреннего прилива происходит при выраженной устойчивой стратификации в районах значительных неоднородностей морского дна. Эволюция и распространение их зависит как от крутизны подводного склона, так и географической широты места и частоты плавучести (плотностной стратификации).

**Результаты моделирования.** На рис. 2 приведены вертикальные разрезы начальных условий по температуре и солёности вдоль центральной оси расчётной области, ориентированной по направлению оси большой оси приливного эллипса, сильно вытянутого вдоль неё (соотношение осей 7:1).

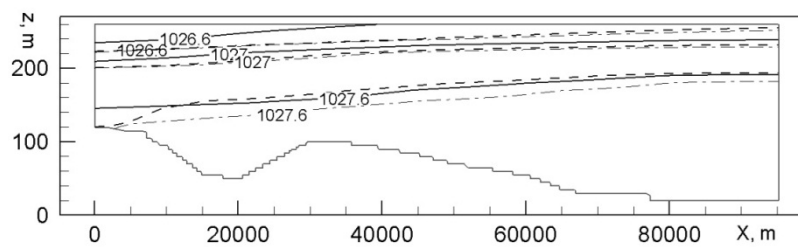
На рис. 3 представлены соответствующие им разрезы плотности, рассчитанной по Мамаеву.

Из приведенных рисунков явствует, что в обоих сценариях начальный пикноклин обострился и опустился ко дну. Во втором сценарии в нижней части области опускание сильнее, но градиенты плотности меньше.

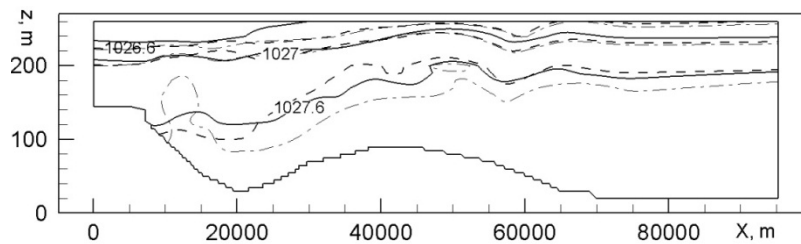
Этими двумя эффектами и объясняются изменения, происшедшие в численных решениях первого и второго сценариев по сравнению с базовым. На рис. 4 на разрезах поля плотности выделены изопикны 1026,6, 1027 и 1027,6  $\text{кг/м}^3$  по результатам решения на момент времени  $5T$  ( $T$ -период  $M2$ ), т. е. 2,5 суток.



**Рис. 2. Вертикальное распределение начальных значений температуры, °С (а) и солёности, ‰ (б) на центральном разрезе. Условные обозначения: сплошная линия – 1990 г.(базовый сценарий), пунктир – 2011 г. при потеплении и усилении течения (первый сценарий), пунктир с точкой – 2011 г. при потеплении и ослаблении течения (второй сценарий)**



**Рис. 3. Вертикальное распределение начальных значений плотности, кг/м³ на центральном разрезе. Условные обозначения см. на рис. 2**

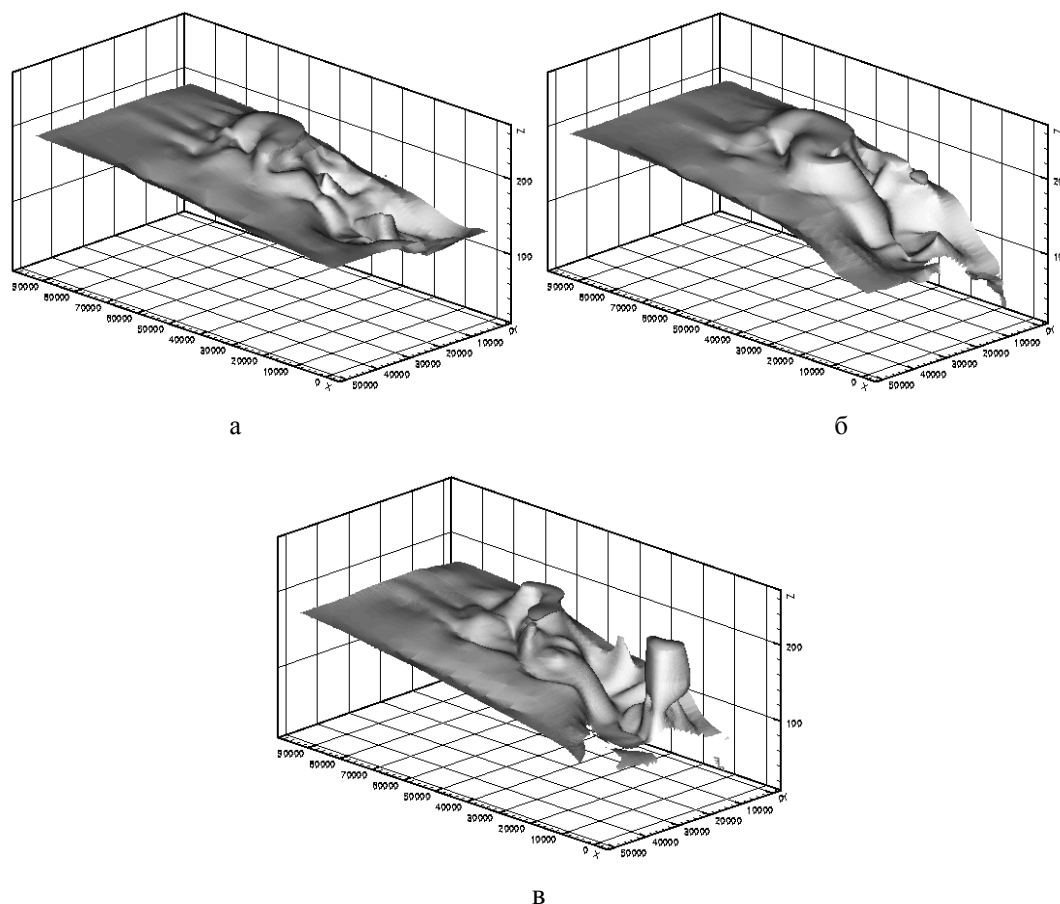


**Рис. 4. Сравнение результатов трех экспериментов на вертикальном разрезе поля плотности спустя 2,5 суток расчета. Условные обозначения см. на рис. 2**

На рис. 4 видно, что при одновременном повышении температуры и солёности (первый сценарий) на пикноклине возникает дополнительные волны, а сам пикноклин опускается приблизительно на 10 метров. Ниже пикноклина генерация коротких внутренних волн ослабевает, а изопикна подтягивается к поверхности.

В случае второго сценария (с ослаблением залива солёной воды) при опускании пикноклина волновая картина на нём мало отличается от базового сценария, в то же время при приближении к неоднородностям дна, происходит обострения процесса генерации коротких внутренних волн.

Второй процесс ещё более наглядно показан на рис. 5, где представлена изопикническая поверхность  $1027,6 \text{ кг/м}^3$ .



**Рис. 5. Изопикническая поверхность  $1027,6 \text{ кг/м}^3$  по базовому (а), первому (б) и второму (в) сценариям**

На рис. 5 можно видеть, что в глубокой части области в случае первого сценария амплитуды волн несколько больше, а количество деталей (проявлений волн) – меньше. Во втором сценарии генерация экстремальных волн обостряется.

Численные оценки подтверждают сделанные выводы. Сравнение средних квадратических отклонений уровня изопикны  $1027,6 \text{ кг/м}^3$  показало, что для базового сценария в среднем по полю отклонения от начальной невозмущенной поверхности составили  $24,9 \text{ м}$ , для первого сценария –  $34 \text{ м}$ , для второго сценария –  $29,9 \text{ м}$ . Таким образом, несмотря на отдельные экстремальные «всплески» изопикнической поверхности во втором сценарии, общая взволнованность в случае первого сценария выше.

**Выводы.** В результате численных экспериментов на трехмерной негидростатической модели для юго-западного района Баренцева моря выяснено, что при климатическом сценарии с повышением температуры поверхности и усилением затока атлантических вод вследствие обострения (сжатия) пикноклина и его «затопления» происходит генерация большего числа мод внутренних волн и увеличение их амплитуд, что увеличивает диапикническое перемешивание в районе пикноклина.

При имитации уменьшения атлантического затока волнообразование на пикноклине мало отличается от среднеклиматического, а вблизи дна вследствие уменьшения вертикальных градиентов плотности внутренние приливные волны мало выражены, но при приближении к неоднородностям дна образуют слабые, но значительные по высоте аномалии плотности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007 / Bernstein L. et al. (eds.). – Cambridge, United Kingdom and New York, Cambridge University Press, 2007.– 940 pp.
2. Фролов И. Е., Ашик И. М., Тимохов Л. А., Соколов В. Т. Основные результаты диагностики состояния воды и льда Северного Ледовитого океана по результатам натурных исследований 2007 и 2008 гг // Тезисы докладов международного совещания по итогам МПГ. 28 сентября – 1 октября 2009 г. г. Сочи. С. 3
3. Häkkinen Sirpa, Peter B. Rhines. Decline of Subpolar North Atlantic Circulation During the 1990s // Science. 2004. Vol. 304, no. 5670. Pp. 555–559. doi: 10.1126/science.1094917
4. Knight J. R., Allan R. J., Folland C. K., Vellinga M., Mann M. E. A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate// Geophysical Research Letters. – 2005. 32. L20708, doi: 10.1029/2005GL024233.
5. Mean yearly temperature and salinity in the Kola section (0-200m) (stations 3–7) / Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича. Мурманск.– URL <http://www.pinro.ru/n22/index.php/ru/structure/labs/labhidro/kolasection>
6. Сафрай А. С., Ткаченко И. В., Гордеева С. М., Белевич М. Ю. Моделирование сезонной изменчивости внутренних приливных волн в Баренцевом море // Навигация и гидрография. 2006. – №2. – С. 118–125.
7. Padman L., Erofeeva L. A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean // Geophys. Res. Letters, 2004, 31(2), L02303. doi:10.1029/2003GL019003
8. DKRZ Report No21. Climatology of the HOPE-G Global Ocean-Sea-Ice General Circulation Model / Deutsches Klimarechencentrum (DKRZ). – Hamburg. September 1999.
9. IBCAO Version 1.0 / National Geophysical Data Center, NESDIS, NOAA, USA. – Electronic resource.– URL <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/ibcaoversion1.html> , free.

#### ***INFLUENCE OF CLIMATIC TREND OF THE BARENTS SEA THERMOHALINE STRUCTURE ON THE INTERNAL TIDES INTENSITY***

**S. M. Gordeeva** (Russian Hydrometeorological University), **A. S. Safray** (St. Petersburg branch of Shirshov Institute of Oceanology, The Russian Acadwmy of Sciences), **I. V. Tkachenko** (St. Petersburg State Marine Technical University)

*In the course of numerical experiments with 3D non-hydrostatic model of the south-west part of the Barents Sea it was shown that in the climatic scenario with sea surface temperature rise and penetration of the Atlantic water growth due to pycnocline sharpening and deepening more internal waves modes of greater amplitudes are generated, which increases the diapicnical exchange.*

*When penetration of the Atlantic water decreases, internal waves generation at the pycnocline is almost climatic. Below the pycnocline the internal waves are weaker. But they produce greater density peculiarities near the bottom heterogeneities.*

## СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

УДК 528.9(091)

### **ГЕРАРД МЕРКАТОР И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ (К 500-летию со дня рождения)**

**В. И. КОРЯКИН**

(280 Центральное картографическое производство ВМФ)

*Герард Меркатор – великий фламандский картограф, который заложил основы новой картографии, базирующейся на строгих математических зависимостях. Им создана картографическая проекция, открывшая новую эпоху в картографии и мореплавании и значительно упростившая прокладку пути судна в море. Эта проекция используется в морской и авиационной картографии и по сей день.*

Герарда Меркатора (рис. 1) – великого фламандского картографа, нередко называют Птолемеем средних веков, подчеркивая тем самым его крупный вклад в географию, навигацию и картографирование земной поверхности.



**Рис. 1. Герард Меркатор**

Меркатор родился 5 марта 1512 г. в восточной Фландрии в небольшом городе Рупельмонде близ Антверпена (современная Бельгия). Он был седьмым ребенком в бедной немецкой семье. Когда ему исполнилось 14 или 15 лет, отец его умер, и семья осталась без средств к существованию. Заботу о мальчике взял на себя его родственник кюре Гизберт Кремер. Он определил Герарда в гимназию небольшого городка Бувде-Дюн. В гимназии изучались теология, древние языки и начала логики. В переводе с немецкого фамилия Кремер означает «лавочник». Видимо, чтобы выглядеть солиднее, Герард во время обучения в гимназии меняет свою фамилию на латинскую Меркатор – «купец», «торговец».

Учеба давалась мальчику легко, и уже через три года он поступает в Лувенский университет, который в то время был крупным научным центром Нидерландов. В университете его особенно увлекли естественные науки и прежде всего астрономия и география. Позже он напишет: «Когда я пристрастился к изучению философии, мне страшно нравилось изучение природы, потому что она дает объяснение причин всех вещей и является источником всякого знания, но я обращался лишь к частному вопросу – к изучению устройства мира». Университетских курсов молодому студенту было недостаточно. Меркатор начинает читать сочинения древних авторов, стремясь познать, что представляет собой окружающий мир, и какие законы управляют его развитием. Чтобы усовершенствовать свои знания по математике, он самостоятельно осваивает геометрию и изучает в подлиннике труды Евклида.



Одновременно он знакомится с трудами античных географов и убеждается в том, что их положения не совпадают с учением Библии. «Заметивший известную разность меж Моисеевым повествованием о Сотворении мира и воззрениями Аристотеля, я усомнился в их разумении и вознамерился проникнуть в тайны природы». На формирование научных взглядов Меркатора большое влияние оказал его ближайший учитель и старший товарищ, известный астроном, географ и гравёр профессор Гемма-Фризиус (1508–1555), автор крупных сочинений по географии и космографии, в том числе труда «Принципы астрономической картографии», в котором он предложил способ определения долготы с помощью точных часов.

Увлечение Меркатора географией и картографией не было случайным. Рассвет его творчества совпал со временем научного и культурного перелома в Европе, перехода от Средневековья к современности, с эпохой Великих географических открытий, освоением неизвестных ранее пространств Мирового океана. В 1488 г. корабли экспедиции португальца Бартоломеу Диаша, стремясь найти морской путь из Европы в Индию, обогнули южную оконечность Африки. В результате этого плавания было установлено, что Атлантический и Индийский океаны соединяются. В 1492–1500 гг. Христофор Колумб совершил четыре экспедиции, открыв Северную и Южную Америку, острова Вест-Индии, Карибское побережье Центральной Америки. В 1497–1499 гг. в результате экспедиции Васко да Гамы был открыт морской путь из Европы в Индию. В 1500–1501 гг. португальская экспедиция П. Кабрала открыла бразильский берег Южной Америки. В 1511 г. были открыты торговые пути в Индонезию и Китай. В 1513–1525 гг. экспедиция испанца В. Нуньес де Бальбоа пересекла Панамский перешеек и достигла Тихого океана. Наконец, в 1519–1522 гг. Ф. Магеллан и Х. С. Эль-Кано совершили первое кругосветное плавание, после чего началось освоение пути через Тихий океан к берегам Азии и поиск новых земель. Это далеко не полный перечень географических открытий, сделанных в конце XV и начале XVI вв., в эпоху значительного расширения географического кругозора. Старые, устоявшиеся представления о земном пространстве стремительно менялись. Надо было осмыслить новое и дать ему объяснение и соответствующее картографическое оформление. Возникла настоятельная необходимость в более точных и надежных картах, полнее отражающих представление о континентах, океанах и морях и учитывающих шарообразность Земли. То, что Земля не плоская, а шарообразная в XVI в. стала осторожно признавать даже церковь. Все настоятельнее требовалось создать модель всей Земли, чтобы изобразить на ней открытые земли и выделить белые пятна. Меркатор начинает собирать и изучать известные морские и сухопутные карты. Он встречается с мореплавателями, расспрашивает их о плаваниях, виденных землях, копирует и анализирует карты, которыми они пользовались. Собранный материал убеждает его в том, что ранее изданные карты лишь очень приблизительно отражают реальную картину расположения морей и материков, и нужны строгие математические основы их построения. Необходимо найти такой способ, который позволил бы без больших искажений изобразить объекты шарообразной Земли на плоской бумаге и был бы удобен для ориентирования.

В 1532 г. Меркатор, окончив университет со степенью «мастер искусств», начинает работать вместе с Гемма Фризиусом над созданием глобусов Земли и Луны. Одновременно с этим он приступает к изготовлению точных оптических инструментов. Чтобы как-то компенсировать немалые финансовые затраты, Герард

принимает приглашение читать лекции в учебных заведениях Лувена по географии и астрономии.

В 1537 г. он выпустил карту Палестины на шести листах. До этого карты этой страны были весьма приблизительны, на них было не более 30 названий. Меркатор нанес на свою карту свыше 400 названий и существенно уточнил очертания границ. В 1538 г. он разработал карту мира в двойной сердцевидной проекции, на которой впервые показал местоположение южного материка. О существовании последнего много говорили моряки и географы, но никто его не видел, и существование его было под большим сомнением. На этой карте впервые название Америка распространено на оба материка Нового света, а сама Америка изображена отделенной от Азии вопреки распространенному тогда ошибочному представлению. Эти карты, благодаря тщательности исполнения и использованию новейших географических знаний, получили высокую оценку современников и принесли Меркатору известность. Новые заказы не заставили себя ждать. В 1540 г. он создает карту Фландрии, а в 1541 г. получает заказ самого императора Священной Римской Империи Карла V на изготовление набора астрономических инструментов. В 1541 г. картограф завершает работу над глобусом Земли, а спустя 10 лет изготавливает глобус Луны. В 1552 г. оба глобуса были подарены автором императору Карлу V. В 1544 г. Меркатор опубликовал карту Европы на 15 листах, устранив на ней ошибки античных и более поздних географов.

Глобус Земли Меркатора не был первым, до него знаменитое «яблоко Земли» было создано в Нюрнберге в 1492 г. немецким астрономом и мореплавателем Мартином Бехаймом (1459–1506). Он отражал последние открытия португальцев и географические познания европейцев накануне открытия Америки Колумбом. Однако на этом глобусе были изображены только Европа, Азия и Африка, занимающие половину поверхности Земли. Не было на глобусе ни Северной и Южной Америки, ни Австралии, ни, конечно, Антарктиды. Атлантический и Тихий океаны были представлены как единый водный бассейн. На поверхности глобуса были нанесены экватор, меридианы, тропики и знаки зодиака, а также представлены краткие описания разных стран и изображения их жителей. Глобус Меркатора отличался большей точностью и информативностью, на нем были исправлены многие ошибки М. Бехайма. Он свободно вращался вокруг оси, проходящей через полюсы и закрепленной внутри массивного медного кольца. Тяжелый готический шрифт, применяемый ранее картографами и занимающий много места, Меркатор заменил на итальянский курсив, что сделало нанесение шрифта и чтение названий более удобным. Работая над глобусом, он вплотную подошел к решению проблемы создания плоской карты в цилиндрической проекции, названной позже его именем.

Во время правления Карла V (1500–1550 гг.) в Нидерландах усилилось преследование католиками протестантов, которым симпатизировал Меркатор. У церковных властей вызвали подозрения его работы над картами и глобусами (они расценивали это как внедрение в божественное и неизменное), критика некоторых положений Библии и частые разъезды. В 1544 г. он был арестован по подозрению в ереси и провел несколько месяцев в изоляции в замке города Рупельмонде. Освободиться от лап инквизиции ему удалось лишь благодаря вмешательству императора Карла V и тот факт, что он никогда не посещал протестантские библейские чтения. Опасаясь за свою жизнь в католической Фландрии, Меркатор в 1552 г. переселяется в Дуйсбург (Германия), где религиозная обстановка была более

терпимой. Удаленность от морских портов и научных центров усложнила его работу, получать новые географические сведения стало значительно труднее. Выручило знакомство Меркатора и переписка с географом Авраамом Ортелием, который держал его в курсе событий. Меркатор продолжает работать над изданием карт. Только теперь ему приходится самому не только составлять карты, но и вычерчивать и гравировать их. В 1552 г. издает карту Европы на 15 листах, на которой впервые были правильно показаны очертания Средиземного моря. В последующие годы были изданы карты Лотарингии (1563) и Британских островов (1564), отличающиеся особенно тонкой работой. Одновременно Меркатор продолжает собирать и анализировать карты разных времен и народов. Выполненный обзор астрономических и картографических работ позволил ему в 1569 г. опубликовать первую часть обобщающего труда «Хронология». Последняя работа отразила картину развития картографии и астрономии с античных времен до середины XVI в.

Карты имели широкое распространение уже в античные времена. До начала нашего летоисчисления они были главным образом маршрутные (дорожные), т. е. изготавливались на небольшие территории Земли, и на них изображались только линейные представления – береговые линии, дороги, реки. Подобные карты не требовали никаких проекций и никакого масштаба. В качестве единиц измерения использовались дни плавания по морю или перехода по суше. Земля принималась за плоский диск. Но уже тогда высказывалась догадка о шарообразности Земли и предпринимались попытки отобразить ее поверхность на плоскости. Древнегреческий философ Аристотель (384–322 до н. э.) считал, что подтверждением шарообразности Земли служит ее тень на лунном диске. Величайший мыслитель древности, основатель научной астрономии грек Гиппарх (ок. 190–125 до н. э.) первым стал определять положение того или иного места на Земле при помощи астрономических наблюдений, при этом расстояние от экватора к полюсам он называл широтой, а расстояние к востоку или к западу от известного пункта – долготой. Он первым начал делить экватор на 360 частей вместо 60, как было до него, а также разработал две новые проекции – стереографическую и ортографическую. Знаменитый астроном, математик и географ Эратосфен Киренский (II в. до н. э.) даже измерил радиус Земли по разности длин полуденной тени от столбов в Александрии и в Сиене. Он определил с поразительной для того времени точностью длину экватора – около 40 000 км. Во II в. до н. э. астрономы и математики ввели более строгое понятие о широте и долготе места, стали наносить сетку меридианов и параллелей на карты. Древнегреческий географ и историк Страбон (64/63 до н. э. – 23/24 н. э.) в своей «Географии» из 17 книг при построении карты всей Земли исходил из принципа ее шарообразности. Вершиной античной географии стал атлас мира, созданный знаменитым географом древности астрономом и физиком Клавдием Птолемеем (ок. 90 – ок. 168). Благодаря его блистательным трудам картография в начале нашего летоисчисления достигла очень высокого развития. Воспользовавшись всеми новейшими географическими и астрономическими достижениями того времени он первым составил карту Земли (рис. 2), применив градусную сетку широт и долгот. При определении широты и долготы какого-либо пункта за первый меридиан Птолемею принимал меридиан Канарских островов. На карте изображены три части света – Азия, Европа и Африка, а также Атлантический океан, Средиземное и другие моря. Стремясь к тому, чтобы изобразить на плоском чертеже правильное соотношение прямолинейных расстояний

с истинными на шаровой поверхности Земли, Птолемей применил простую коническую проекцию. Поскольку создавалась карта не только по достоверным данным, но и по слухам, порой фантастическим, земли на ней были изображены часто с большими искажениями, в особенности удаленные от Средиземного моря. Тем не менее, карта оказалась лучшей вплоть до XV в. Она служила главным стимулом к развитию картографии у арабов, а затем и в эпоху Возрождения. Наряду с этим Птолемей составил обширный справочник по координатам различных географических точек и учебник по составлению карт.



Рис. 2. Птолемея карта мира. Гравюра на дереве

В дальнейшем, в эпоху Средневековья, география и картография в Европе не получили значительного развития, поскольку наука находилась под контролем Католической Церкви, подавлявшей самостоятельную и свободную мысль, и сводилась в основном к толкованию авторитетов. Интерес к светским знаниям не поощрялся, естественные науки вообще и картография в частности приходили в упадок.

Раннее христианство отвергало языческий, основанный на опыте способ исследования природы. Научные методы заменялись верой в сверхъестественное, всякие знания должны были увязываться с христианским вероучением. Невежество задавило и заменило здравую человеческую мысль. Весь опыт древних и многовековая работа ума погибли. Большинство географических знаний античности были забыты и утрачены. Географические воззрения людей под влиянием Библии и остатков язычества начинают складываться почти вновь. Снова получают распространение четырехугольные, круглые, яйцеобразные и другие карты, построенные на основании фантазий и теологических представлений. Собрание карт Птолемея, восстановленное по рукописям (оригиналы карт погибли вместе со сгоревшей в 47 г. до н. э. Александрийской библиотекой) в V в. Агафодемоном, было впервые опубликовано на латинском языке только в 1472 г. [4]. В дальнейшем карты Птолемея не раз переиздавались, но в них не вносилось ничего нового, и они были лишены каких-либо математических основ.

В средние века на картографию заметно повлияло лишь изобретение магнитного компаса и книгопечатания. В XIII–XIV вв. в Европе начинает широко применяться магнитный компас, что способствовало созданию морских навигационных так называемых компасных карт (портуланов) (рис. 3). На них уже достаточно точно изображалась береговая линия, вместо сетки параллелей и меридианов, были нанесены линии, которые расходились из нескольких точек, называемых розами ветров. Число роз ветров обычно достигало 16, и располагались они вокруг изображаемого участка. Чертились карты также без учета сферичности Земли. Градусной сетки компасные карты не имели, изображения на них сопровождалось пояснительными надписями. В отношении точности они, благодаря использованию магнитного компаса, превосходили все карты предшествующих веков. Чертились компасные карты в виде четырехугольника в противоположность круглым и овальным картам. Наиболее известны Каталонские компасные карты, составленные в 1375–1377 гг. Авраамом Крескесом. В них отразился весь опыт мореплавателей, накопленный к тому времени.

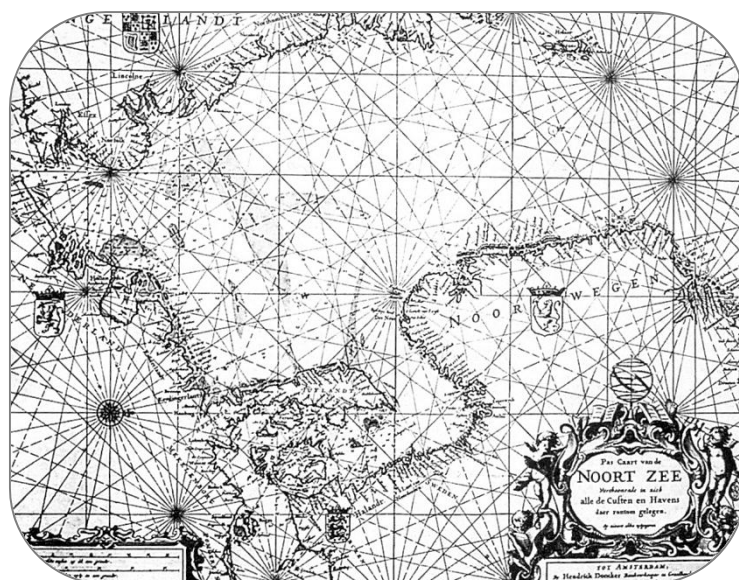


Рис. 3. Компасная карта Северного моря

Географические открытия, изобретение компаса, книгопечатания и создание более совершенных астрономических и навигационных инструментов дали толчок и новому этапу развития картографии.

Нужны были карты, на которых можно было прокладывать свой путь, измерять углы и отмечать периодически свое местоположение. Наиболее точно отражает поверхность Земли глобус, и чем он больше, тем точнее. Но крупный глобус не возьмешь на корабль, к тому же на нем линия, соединяющая две точки, представляет собой дугу – ортодромию, а мореплавателю, ведущему корабль по магнитному компасу, нужна прямая. Надо было создать карту с изображением земного шара или его части на плоскости так, чтобы отображения всех точек земной поверхности соответствовали бы их истинному положению, а очертания стран искажались возможно меньше.

Меркатор, проанализировав весь опыт прошлого, берется за решение этой задачи и приступает к разработке математических основ картографии. Этот труд увенчался созданием нескольких новых картографических проекций. Для морских навигационных карт он предложил равноугольную цилиндрическую проекцию, получившую наибольшее распространение под названием меркаторской. Эту проекцию Меркатор получил, поместив географический глобус, т. е. изображение земного шара, по экватору внутрь цилиндра так, что ось цилиндра совпала с осью земного шара (глобуса). Затем спроектировал изображения земных меридианов и параллелей на поверхность цилиндра, который после этого развернул в плоскость. Полученная на плоскости картографическая сетка выглядит в этом случае как система прямых параллельных между собой линий – земных меридианов, перпендикулярных другим параллельным между собой линиям – параллелям. Равноугольная в названии означает, что проекция сохраняет правильность углов и направлений и не искажает формы объектов (рис. 4).

Кратчайшие расстояния между пунктами изображаются прямыми линиями (локсодромиям), т. е. прямая линия, проведенная в произвольном направлении, является линией постоянного курса (пересекает меридианы под одним углом). Приполюсные области не могут быть изображены в проекции Меркатора, поэтому карту в этой проекции ограничивают областями до 80–85° северной и южной широты. Масштаб на такой карте не постоянный, он увеличивается от экватора к полюсам как обратный косинус широты.

Недостаток прямоугольной цилиндрической проекции – искажения размеров географических объектов и, чем ближе к полюсам, тем значительнее. Но для мореплавателя это не так важно. Важнее то, что такая проекция позволяет легко выбрать нужное направление и контролировать свое местоположение.<sup>1</sup>

Эта проекция получила всеобщее распространение и применяется до настоящего времени не только в мореплавании, но и в авиации, т. е. там, где требуется точное и правильное изображение направления и углов. Впервые фламандский картограф применил ее при составлении навигационной карты мира на 18 листах (рис. 5). Она была опубликована в 1569 г. под названием «Новое и наиболее полное изображение земного шара, проверенное и приспособленное для применения в навигации». Появление этой карты многие считают началом научной картографии.

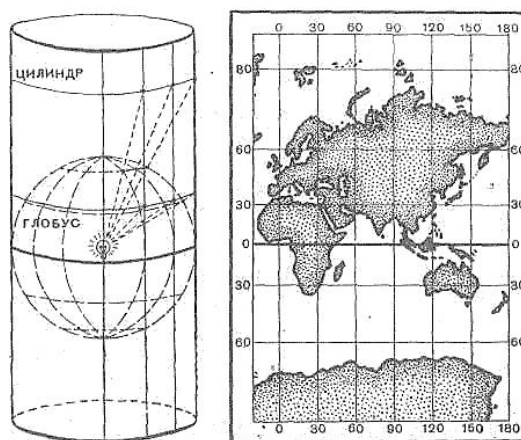


Рис. 4. Схема построения цилиндрической проекции

<sup>1</sup> Предполагают, что прямоугольная проекция была впервые предложена в самом общем виде, т. е. без учета математических зависимостей и только для районов вблизи экватора, знаменитым математиком древности Анаксимандром (610–546 до н. э.), но широкое практическое применение она получила лишь благодаря Меркатору, давшему математически обоснованный принцип ее построения.

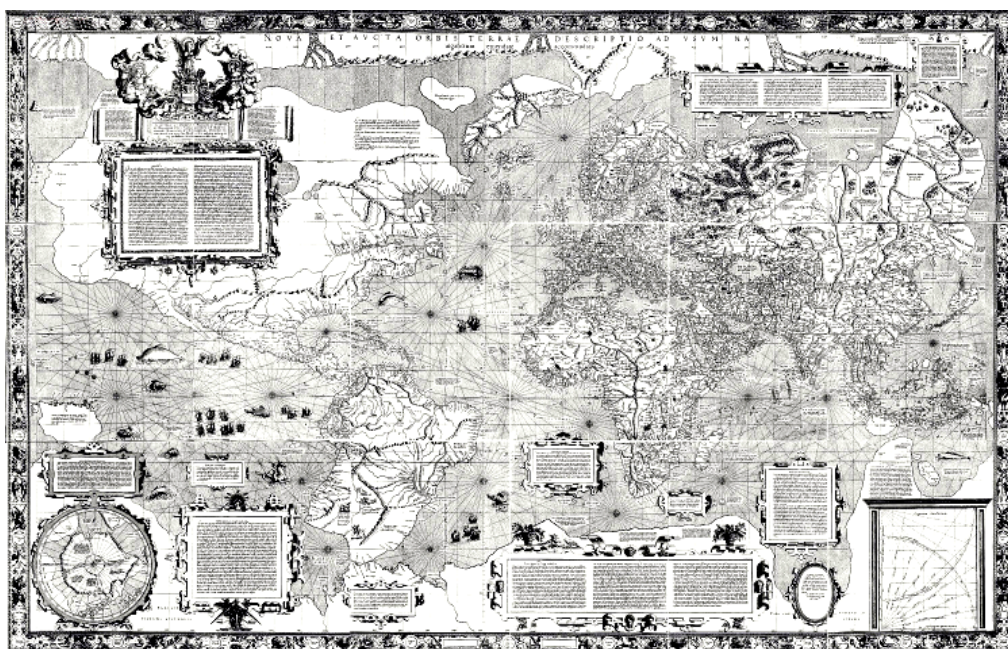


Рис. 5. Карта мира Г. Меркатора

Круг интересов Меркатора не ограничивался картографией, он занимался еще изучением земного магнетизма и вычислил координаты магнитного полюса Земли, а также указал на несовпадение северного магнитного полюса с географическим. Но основной его работой в последние годы жизни стал сборник карт европейских стран, который он назвал атласом. Полное его название – «Атлас или картографические соображения о сотворении мира и вид мира сотворенного» (рис. 6).

Он представлял собой собрание карт с кратким описанием, названное именем мифического титана Атланта, по преданию поддерживавшего небесный свод. Этот всеобъемлющий труд не был им завершен – полностью атлас был опубликован его сыном Румольдом в 1595 г., т. е. после смерти великого картографа. Атлас содержал 107 (по другим данным 112) карт и представлял в новой проекции все открытые на тот период земли. В 1611 г. было напечатано расширенное издание атласа, переведенное на многие языки и высоко оцененное современниками.

Меркатор был женат на Барбаре Шеллекен, с которой он обвенчался в 1536 г. Она родила ему шестерых детей – трех сыновей и трех дочерей. Все сыновья хотели также стать картографами, но пережил отца и продолжил его дело только один Румольд.



Рис. 6 Титульный лист атласа Г. Меркатора

В 1590 г. с Меркатором случился инсульт, он потерял речь, и левая часть его тела была парализована. Тем не менее, он продолжал в силу своих возможностей работать, стремясь успеть завершить задуманное. 2 декабря 1594 г. картограф скончался в Дуйсбурге. С уходом Меркатора в картографии закончилась великая эпоха возрождения научной мысли, явившаяся результатом великих географических открытий и достижений в различных научных областях в середине XVI столетия. В последующий период вплоть до XVIII столетия развитие картографии происходило под влиянием работ Меркатора, когда в основном переиздавались его труды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Багров Л. История картографии. – М.: Центрполиграф, 2004. – 319 с.
2. Быковский Н. М. Картография. Исторический очерк. – М-Л.: Гос. изд-во, 1923. – 207 с.
3. Зондерван Г. Географическая карта, ее история, составление, воспроизведение. – СПб.: Картографическое заведение А. А. Ильина, 1909. – 248 с.
4. Корякин В. И., Хребтов А. А. От астролябии к навигационным комплексам. – СПб.: «Судостроение», 1994. – 235 с.
5. Салищев К. А. Основы картоведения. В 2-х тт. – Т. 2. – М.: Геоиздат, 1962. – 183 с.

#### *GERHARD MERCATOR AND MARINE CARTOGRAPHY (On the occasion of the 500-th anniversary of his birthday)*

**V. I. Koryakin** (Central Chart Division of the Navy)

*Gerhard Mercator is a great Flemish cartographer. He laid down the foundation of new cartography based on strict mathematic relationships. He created the cartographic projection that marked a new era in cartography and navigation, having considerably simplified the navigational plotting at sea. This projection is still used in the marine air-navigation cartography nowadays.*



---

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

---

**АЛЕКСЕЕВ Сергей Петрович,**

Президент ОАО «ГНИНГИ», контр-адмирал, докт. техн. н., профессор, заслуженный военный специалист РФ, председатель Санкт-Петербургского регионального отделения Российского общественного института навигации. Окончил Высшее военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и Военно-морскую академию им. Н. Г. Кузнецова. Специализация – штурман. Автор более 200 печатных трудов.

E-mail: mail@gningi.ru

**ГОЛЯКОВ Алексей Дмитриевич,**

главный специалист ОАО «Научно-исследовательский институт точной механики», докт. техн. н., профессор. Окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского. Специализация – навигация и безопасность. Автор более 120 печатных работ.

E-mail: algol49@narod.ru

**ГОРДЕЕВА Светлана Михайловна,**

доцент кафедры промысловой океанологии и охраны природных вод ФГБОУ ВПО Российский гидрометеорологический университет (РГГМУ), канд. геогр. н. Окончила РГГМУ. Специализация – «океанология». Автор 67 печатных работ.

E-mail: gordeeva@rshu.ru

**ЖУКОВ Юрий Николаевич,**

ведущий научный сотрудник ОАО «ГНИНГИ», докт. техн. н. Окончил Ленинградский гидрометеорологический институт. Специализация – гидрометеорология. Автор более 70 печатных трудов.

Тел. +7(812)322-63-39

**КОРЯКИН Виталий Иванович,**

старший редактор морских карт Центрального картографического производства ВМФ, капитан 1 ранга в отставке. Окончил Балтийское высшее военно-морское училище и Военно-морскую академию. Специальность – военный инженер-гидрограф. Автор 63 печатных работ.

**Sergey P. ALEKSEYEV,**

President of «GNINGI» OJSC, Rear-Admiral, DSc, professor, Honoured Military Specialist, chairman of St. Petersburg regional branch of the Russian Public Institute of Navigation. Graduated from Frunze Naval College and Kuznetsov Naval Academy. Speciality: navigation. Author of more than 200 publications.

E-mail: mail@gningi.ru

**Aleksey D. GOLYAKOV,**

Main Expert, «Research Institute of Fine Mechanics» JSC, professor. DSc, professor. Graduated from Mozhaisky Military Space Academy. Speciality – navigation and safety. Author of more than 120 publications.

E-mail: algol49@ narod.ru

**Svetlana M. GORDEEVA,**

Reader of the Department for fisheries oceanology and protection of natural waters, the Russian Hydrometeorological University, CandSc (geography). Graduated from the Russian Hydrometeorological University, majoring in oceanology. Author of 67 scientific and methodical publications.

E-mail: gordeeva@rshu.ru

**Yuri N. ZHUKOV,**

Leading researcher, «GNINGI» OJSC, DSc. Graduated from Leningrad Hydrometeorological Institute. Speciality: hydrometeorology. Author of more than 70 publications.

Phone +7(812)322-63-39

**Vitaly I. KORYAKIN,**

Editor-in-chief of marine charts, Central Chart Division of the Navy. Captain 1-st Rank (Ret). Graduated from Baltic Naval College and the Naval Academy. Speciality: military engineer-hydrographer. Author of 63 publications.

**ЛЕБЕДЕВ Герман Андреевич**,  
заведующий отделом физики льда и океана  
ФГБУ «Арктический и антарктический научно-  
исследовательский институт» (ААНИИ), докт.  
физ.-мат. наук. Окончил Ленинградский  
электротехнический институт им. В. И. Ульянова.  
Специализация – физические поля океана,  
физические свойства льда, методы разрушения  
льда, дистанционные методы исследования  
ледяного покрова. Автор 193 печатных работ.

E-mail: lebedev@aari.nw.ru

**ЛЕДЕНЕВ Николай Иванович**,  
начальник научно-исследовательского  
управления навигации ОАО «ГНИНГИ»,  
капитан 1 ранга в запасе, канд. техн. н. Окончил  
Военно-морское училище им. М. В. Фрунзе и  
Военно-морскую академию. Специализация –  
морская навигация. Автор более 40 печатных  
работ.

E-mail: ins@gningi.ru

**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.

E-mail: info@gningi.ru

**МАСТРЮКОВ Сергей Иванович**,  
ведущий научный сотрудник ОАО «ГНИНГИ»,  
полковник в запасе, канд. техн. н. Окончил  
Ленинградский гидрометеорологический  
институт. Специализация – океанология. Автор  
более 100 печатных работ.

Тел. +7(812)322-63-22

**САФРАЙ Аркадий Саулович**,  
заведующий лабораторией геофизических  
пограничных слоёв Санкт-Петербургского  
филиала Института океанологии  
им. П. П. Ширшова РАН, канд. физ.-мат. наук.  
Окончил Ленинградский гидрометеорологический  
институт. Специализация – метеорология.  
Автор более 60 печатных работ.

E-mail: safr@ioras.nw.ru

**German A. LEBEDEV**,  
Head of Department for physics of ice and ocean,  
«Arctic and Antarctic Research Institute» (AARI),  
DSc. Graduated from Leningrad Electrotechnical  
Institute. Speciality: physical fields of the ocean,  
physical properties of ice, methods of ice  
destruction, remote methods of exploration of the  
ice cover. Author of 193 scientific publications.

E-mail: lebedev@aari.nw.ru

**Nikolai I. Ledenyev**,  
Director of research department of navigation,  
«GNINGI» OJSC. Captain 1st rank (Ret.), CandSc.  
Graduated from Frunze Naval College and  
Kuznetsov Naval Academy. Speciality: navigation.  
Author of more than 40 publications.

E-mail: ins@gningi.ru

**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.

E-mail: info@gningi.ru

**Sergei I. MASTRYUKOV**,  
Leading researcher, «GNINGI» OJSC, Colonel  
(Ret.), CandSc. Graduated from St. Petersburg  
Hydrometeorological Institute. Speciality:  
oceanology. Author of more than 100 publications.

Phone +7(812)322-63-22

**Arkady S. SAFRAY**,  
Head of laboratory for geophysical boundary layers,  
St. Petersburg branch of Shirshov Institute of  
Oceanology, the Russian Academy of Sciences,  
CandSc (physics-mathematics). Graduated from  
Leningrad Hydrometeorological Institute, majoring  
in meteorology. Author of more than 60  
publications.

E-mail: safr@ioras.nw.ru

**СЕЛИВЁРСТОВ Алексей Сергеевич**,  
начальник отдела ОАО «ГНИНГИ», капитан 1  
ранга в запасе. Окончил Высшее военно-  
морское училище им. М. В. Фрунзе и Военно-  
морскую академию им. Н. Г. Кузнецова.  
Специализация – навигация. Область научных  
интересов – развитие космических  
навигационных технологий и систем. Автор  
шести печатных работ.

Тел. +7(812)322-10-60

**ТКАЧЕНКО Игорь Вячеславович**,  
доцент Санкт-Петербургского государственного  
морского технического университета, канд.  
техн. н. Окончил Санкт-Петербургский  
государственный морской технический  
университет. Специализация –  
гидроаэромеханика. Автор 64 печатных работ.

E-mail: igor.v.tkachenko@mail.ru

**ТРИПОЛЬНИКОВ Владимир Петрович**,  
ведущий научный сотрудник отдела физики  
льда и океана ФГБУ «Арктический и  
антарктический научно-исследовательский  
институт» (ААНИИ). Канд. физ.-мат. наук.  
Окончил Ленинградский государственный  
университет. Специализация – физические поля  
океана, физические свойства льда, методы  
разрушения льда. Автор 50 печатных работ.

Тел: +7(812)337-31-66

**Alexey S. SELIVERSTOV**,  
Chief of division, «GNINGI» OJSC. Captain 1<sup>st</sup>  
rank (Ret.). Graduated from Frunze Naval College  
and Kuznetsov Naval Academy. Speciality:  
navigation. Sphere of scientific interests:  
development of space navigation technologies and  
systems. Author of six publications.

Phone +7(812)322-10-60

**Igor V. TKACHENKO**,  
reader, St Petersburg State Marine Technical  
University, CandSc. Graduated from St. Petersburg  
State Marine Technical University, majoring in  
hydroaeromechanics. Author of 64 publications.

E-mail: igor.v.tkachenko@mail.ru

**Vladimir P. TRIPOLNIKOV**,  
Leading researcher of Department for physics of ice  
and ocean, «Arctic and Antarctic Research  
Institute» (AARI), CandSc. Graduated from  
Leningrad State University. Speciality: physical  
fields of the ocean, physical properties of ice,  
methods of ice destruction. Author of 50  
publications.

Phone +7(812)337-31-66

---

## РЕФЕРАТЫ

---

УДК 551.46

**Трагедия самоподъемной плавучей буровой установки «Кольская».** С. П. Алексеев, С. И. Матрюков – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 7–15.

Проанализировано состояние погодных условий и качество учета гидрометеорологических условий при планировании операции по буксировке самоподъемной буровой установки «Кольская» в декабре 2011 г. Сделан вывод о том, что заблаговременное планирование буксировки было осуществлено без учета особенностей ветро-волнового режима Охотского моря, что могло стать первопричиной трагедии.

**Ключевые слова:** буровая установка, буксировка, планирование морских операций, гидрометеорологические условия.

УДК 629.783.527

**Особенности, состояние и перспективы развития е-Навигации морских объектов.** П. И. Малеев, Н. И. Леденев – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 16–21.

Усложнение в последние годы условий мирового морского судоходства ведет к повышению требований к навигации. Развитие электроники, вычислительной техники и связи указывают на возможность удовлетворения этих требований, что позволит значительно повысить безопасность мореплавания. Это дало начало разработкам новой концепции навигации, получившей название е-Навигации. В статье рассмотрены основные задачи, стоящие перед е-Навигацией, необходимость и последовательность их решения, ожидаемые преимущества по сравнению с существующими средствами, состояние и перспективы развития.

**Ключевые слова:** суда, береговые системы, бортовые системы, связь, комплекс, безопасная навигация, навигационные системы.

УДК 733.34.37.39.05

**Инвариантность теоретически оптимального дискриминатора задержки к направлению смены символов кода сигналов навигационных спутников.** А. С. Селиверстов – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 21–27.

В статье приводится вывод формулы для оценивания задержки кода, обеспечивающей инвариантность теоретически оптимального дискриминатора задержки к направлению смены символа кода.

**Ключевые слова:** Дискриминатор задержки, граница смены символов кода, инвариантность, псевдослучайная последовательность, синфазная огибающая сигнала.

УДК 629.7

**Анализ возможности уточнения параметров движения навигационного космического аппарата по измерениям высоты его полёта.** А. Д. Голяков – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 28–35.

Для совершенствования систем спутниковой навигации, используемой при решении задач навигационно-гидрографического обеспечения морской деятельности проведен анализ возможности определения параметров движения центра масс навигационного космического аппарата бортовым высотомером. В статье с использованием теории статистического оценивания точности определения параметров движения центра масс космических средств приведен перечень векторов, которые могут определяться по измерениям высоты полета, и ковариационные матрицы соответствующих погрешностей навигации.

**Ключевые слова:** навигационный космический аппарат, высота полета, случайные погрешности измерений, параметры движения центра масс космического аппарата, ковариационные матрицы погрешностей навигации.

УДК 528.92

**Способ оценки качества данных о глубинах для отображения формы рельефа дна.** Ю. Н. Жуков – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 36–45.

В статье вводится и обосновывается применение трехмерной триангуляции Делоне для оценки характеристик качества массива глубин для восстановления поверхности рельефа дна. Приводится пример применения трехмерной триангуляции с оценкой характеристик качества исходных данных.

**Ключевые слова:** поверхность рельефа, трехмерная триангуляция Делоне, альфа-форма.

УДК 528.92

**Критерий корректности вычислений гармонических постоянных методом наименьших квадратов.** Ю. Н. Жуков – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 45–50.

В гармоническом анализе приливов длина интервала наблюдений определяет число и значения частот приливных гармоник, используемых для анализа. В традиционных методах гармонического анализа приливов необходимая длина наблюдений определяется критерием Рэлея. Однако при использовании метода наименьших квадратов этот критерий не эффективен. В статье определяется специальный критерий для метода наименьших квадратов.

**Ключевые слова:** приливы, гармонические постоянные, гармонический анализ приливов, метод наименьших квадратов.

УДК 551.326.6/7+62

**О проведении мероприятий безопасности при наличии ледовой угрозы морским сооружениям.** Г. А. Лебедев, В. П. Трипольников – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 50–55.

Предлагается определять критерий опасности позиции айсберга относительно морского сооружения по вероятности его фатального перемещения в контакт, и . при наличии угрозы по данному критерию проводить активное противодействие дальнейшему движению айсберга с соблюдением безопасности в операциях его буксировки или разрушения взрывами.

**Ключевые слова:** дрейфующие ледяные объекты, айсберги, морские сооружения, ледовые угрозы, концепция безопасности, вероятность, риски принятия решений, активное противодействие.

УДК 551.466.3

**Вероятностная модель штормов и окон погоды.** С. И. Мاستрюков – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 56–66.

Изложен подход к моделированию временных рядов штормов и окон погоды по сведениям об их повторяемости. По результатам реанализа ветра в Норвежском, Баренцевом и Белом морях за 1975–2002 гг. получены статистические связи повторяемости штормов со средними значениями количества штормов и их непрерывной продолжительности, а также статистические связи между функциями распределения числа штормов и их непрерывной продолжительности со средними значениями количества штормов и их непрерывной продолжительности. На основе выявленных закономерностей построена вероятностная модель, позволяющая генерировать временную последовательность штормов и окон погоды. Верификация модели выполнена путем расчета невязок между задаваемой и модельной повторяемостью штормовых условий для совокупности из 100 рядов продолжительностью 1 месяц. Модель пригодна для расчета статистических характеристик окон погоды заданной непрерывной продолжительности, необходимых при планировании сложных морских транспортных операций.

**Ключевые слова:** вероятностная модель, окна погоды, планирование морских операций, повторяемость штормовых условий, непрерывная продолжительность.

УДК 551.465.432 (265.546-17)

**Оценка изменчивости гидрофизических условий в Беринговом проливе по данным американских и российско-американских исследований 1992–2010 гг.** С. И. Мاستрюков – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 66–80.

Проанализирована вертикальная структура течений и изменчивость температуры, солености и течений в придонном слое Берингова пролива на основе материалов американских и российско-американских исследований Берингова пролива за период с 1992 по 2010 годы. Выявлена тенденция увеличения скорости переноса тихоокеанских вод в Чукотское море и Северный Ледовитый океан, а также отсутствие значимой тенденции изменения температуры и солености глубинных вод в районе Берингова пролива. Оценена сезонная изменчивость гидрофизических условий.

**Ключевые слова:** исследования Берингова пролива, гидрофизические условия, скорость переноса вод, сезонная и межгодовая изменчивость.

УДК 551.466.88

**Влияние климатических изменений термохалинной структуры Баренцева моря на интенсивность внутренних приливных волн.** С. М. Гордеева, А. С. Сафрай, И. В. Ткаченко – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 81–87.

В результате численных экспериментов с трехмерной негидростатической моделью юго-западного района Баренцева моря выяснено, что при климатическом сценарии с повышением температуры поверхности и усилением затока атлантических вод вследствие обострения пикноклина и его опускания происходит генерация большего числа мод внутренних волн и увеличение их амплитуд, что увеличивает диапикническое перемешивание в районе пикноклина. При имитации уменьшения атлантического затока волнообразование на пикноклине мало отличается от среднеклиматического, а вблизи дна вследствие уменьшения вертикальных градиентов плотности внутренние приливные волны мало выражены, но при приближении к неоднородностям дна, образуют слабые, но значительные по высоте аномалии плотности.

**Ключевые слова:** внутренние приливные волны, климатические сценарии, негидростатическая модель, юго-запад Баренцева моря.

УДК 528.9(091)

**Герард Меркатор и морская картография (К 500-летию со дня рождения).** В. И. Корякин – Навигация и гидрография. – 2012. – №33. – С. 88–96.

Герард Меркатор – великий фламандский картограф, который заложил основы новой картографии, базирующейся на строгих математических зависимостях. Им создана картографическая проекция, открывшая новую эпоху в картографии и мореплавании, значительно упростив прокладку пути судна в море. Эта проекция используется в морской и авиационной картографии и по сей день.

**Ключевые слова:** Меркатор, карты, география, картография, Средневековье, Мировой океан, географические открытия, проекция.

---

# ABSTRACTS

---

**Tragedy of the «Kolskaya» Self-elevatory Floating Drilling Rig.** S. P. Alekseyev, S. I. Mastryukov – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 7–15.

The weather conditions and quality of due regard for the hydrometeorological conditions when planning the operation of towing the «Kolskaya» drilling rig in December 2011 are analysed. The following conclusion has been drawn: the preliminary planning of the towing operation was carried out without due regard for the specific features of the wind and wave regime of the Sea of Okhotsk, which could become the prime cause of the tragedy.

**Key words:** drilling rig, towing, planning of maritime operations, hydrometeorological conditions.

**Specific Features, State and Prospects of Development for e-Navigation of Maritime Objects.** P. I. Maleyev, N. I. Ledenyev – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 16–21.

The increasing complexity of conditions for the global maritime navigation results in the enhanced requirements to navigation. The development of electronics, computing technology and communications shows the possibility to satisfy these requirements and thus to increase, to a considerable degree, the safety of navigation. This gave rise to development of the new concept of navigation called e-Navigation. The main tasks of the concept, the necessity and sequence of their solutions, the expected benefits as compared to the existing means, the state and prospects of development are considered.

**Key words:** vessels, coastal systems, shipborne systems, complex, communications, safe navigation, navigation systems.

**Invariance of the Theoretically Optimum Delay Discriminator to Direction of the Ranging Code Symbol Change of Navigation Satellites Signals.** A. S. Seliverstov – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 21–27.

Derivation of the formula intended to evaluate the code delay providing the invariance of theoretically optimum delay discriminator to direction of the code symbol change is presented.

**Key words:** delay discriminator, boundary of the ranging code symbol change, delay lock loop (DLL) system.

**Analysis of the Possibility to Adjust the Parameters of Navigation Spacecraft Movement Using the Measurement of the Height of its Flight.** A. D. Golyakov – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 28–35.

To improve the satellite navigation systems used for solving the tasks of navigation-hydrographical support for the maritime activities, the analysis of the possibility to determine the parameters of motion of the center of mass of the navigation spacecraft by the flight altimeter is carried out. Using the theory of statistical estimation of the accuracy of the determination of the parameters of motion of the center of mass of the space assets, the vectors that can be determined by measurements of the height of flight, and the variance-covariance matrix of the corresponding navigation uncertainties are listed.

**Key words:** navigation spacecraft, flight height, random errors of measurements, parameters of motion of the center of mass of the spacecraft, variance-covariance matrix of navigation errors.

**Evaluation Method of Depth Data Quality Used to Display the Bottom Configuration.** Y. N. Zhukov – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 36–45.

The employment of 3D Delaunay triangulation used to evaluate the characteristics of the depths quality for reconstruction of the bottom relief surface is introduced and substantiated. An example of using the 3D triangulation with evaluation of the initial data quality characteristics is given.

**Key words:** relief surface, 3D Delaunay triangulation, alpha-form.

**Criterion of Correctness for Calculation of Harmonic Constants by the Least Squares Method.**

Y. N. Zhukov – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 45–50.

The method used to evaluate the admissible interval of sea level observations in calculation of the harmonic constants for the sea level tidal variations by the least squares method is considered.

**Key words:** tide, harmonic constants, harmonic analysis of tides, the least squares method, sea level observations.

**On Safety Measures in the Presence of Ice Hazard for Marine Structures.** G. A. Lebedev, V. P. Tripolnikov – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 50–55.

It is proposed to determine the criterion of hazard for the iceberg position relative to the marine structure, using the probability of its fatal movement to the contact. In the presence of the hazard by this criterion, it is suggested to take the active countermeasures to prevent the further movement of the iceberg, taking the precautions in the operations during its towing or destruction by explosions.

**Key words:** drifting ice objects, iceberg, marine structures, ice hazards, concept of safety, probability, risks of decision-making, active countermeasures.

**Probabilistic Model of Storms and Good Weather Windows.** S. I. Mastryukov – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 56–66.

The approach to modeling the time series of storms and good weather windows, using the information about their recurrence rate is set forth. Based on the reanalysis results of wind in the Norwegian, Barents and White Seas for 1975–2002, the statistical relationships of the storms recurrence rate with the average values of the number of storms and their continuous duration, as well as the statistical relationships between the distribution functions of the number of storms and their continuous duration with average values of the number of storms and their continuous duration have been obtained. Using the revealed regularity as a basis, the probabilistic model that allows to generate the temporal sequence of storms and good weather windows, has been built. Verification of the model was carried out by calculation of the discrepancies between the set and model recurrence rate of the storm conditions for a total of 100 sets one month long. The model can be used to calculate the statistical characteristics of the good weather windows of the set continuous duration required when planning the complicated marine transport operations.

**Key words:** probabilistic model, good weather windows, planning of maritime operations, recurrence rate of storms, continuous duration.

**Evaluation of Variability of Hydrophysical Conditions in the Bering Strait based on the data of the American and Russian-American Explorations in 1992–2010.** S. I. Mastryukov – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 66–80.

The vertical structure of currents and variability of temperature, salinity and currents in the near-bottom layer of the Bering Strait, based on the materials of the American and Russian-American explorations of the Bering Strait in 1992–2010 are analysed. The tendency to increase the transport speed of the Pacific waters to the Chuckchee Sea and the Arctic Ocean and the absence of the significant tendency to change the temperature and salinity of the deep waters in the area of the Bering Strait have been revealed. The seasonal variability of hydrophysical conditions has been evaluated.

**Key words:** explorations of the Bering Strait, hydrophysical conditions, transport speed of waters, seasonal and interannual variability.



**Influence of Climatic Trend of the Barents Sea Thermohaline Structure on the Internal Tides Intensity.**  
S. M. Gordeeva, A. S. Safray, I. V. Tkachenko – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 81–87.

In the course of numerical experiments with 3D non-hydrostatic model of the south-west part of the Barents Sea it was shown that in the climatic scenario with sea surface temperature rise and penetration of the Atlantic water growth due to pycnocline sharpening and deepening more internal waves modes of greater amplitudes are generated, which increases the diapycnical exchange. When penetration of the Atlantic water decreases, internal waves generation at the pycnocline is almost climatic. Below the pycnocline the internal waves are weaker. But they produce greater density peculiarities near the bottom heterogeneities.

**Key words:** internal (tide) waves, climatic scenario, non-hydrostatic model, the south-west part of the Barents Sea.

**Gerhard Mercator and Marine Cartography (On the occasion of the 500-th anniversary of his birthday).**  
V. I. Koryakin – Navigation and Hydrography. – 2012. – No. 33. – P. 88–96.

Gerhard Mercator is a great Flemish cartographer. He laid down the foundation of new cartography based on strict mathematic relationships. He created the cartographic projection that marked a new era in cartography and navigation, having considerably simplified the navigational plotting at sea. This projection is still used in the marine air-navigation cartography nowadays.

**Key words:** Mercator, charts, geography, cartography, the Middle Ages, the World ocean, projection, geographic discovery.

---

## ИНФОРМАЦИЯ

---

### Глубокоуважаемые коллеги!

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

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

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

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

### Информация для авторов

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 УДК*. К работе прилагаются *аннотация, ключевые слова и сведения об авторах*.

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

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

В сведениях об авторах указываются: фамилия, имя, отчество; полное наименование учреждения, где работает автор; должность; ученая степень, звание;

воинское звание (если имеется); полное наименование высшего учебного заведения, которое закончил автор; специализация; количество опубликованных научных трудов. Кроме того, авторам необходимо указать контактную информацию: почтовый и электронный адрес, 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 Equation.

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

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

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

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

#### Подписка на журнал «Навигация и гидрография»

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

Периодичность выхода – два номера в год.

Стоимость одного номера 200 руб., включая НДС 18%.

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

Архив журнала в формате PDF доступен на сайтах ОАО «ГНИНГИ» [www.gningi.ru](http://www.gningi.ru) и [www.гнинги.рф](http://www.гнинги.рф).

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



## НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ, 2012, №33

Научный редактор П. И. Малеев  
Редактор И. Ю. Бугрова  
Технический редактор В. Ю. Бахмутов  
Редактор-переводчик Г. В. Трибуц

Подписано в печать 20.06.2012 г.  
Тираж 300 экз.  
Заказ № 03/32-12 от 20.06.2012 г.

---

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

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

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук»

Электронная версия журнала размещена на сайте [www.gningi.ru](http://www.gningi.ru)

---

---

© ОАО «Государственный научно-исследовательский  
навигационно-гидрографический институт»