ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

47/2017

# НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ



Санкт-Петербург

## ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

## навигация и гидрография

издается с 1995 года

47 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санкт-Петербург

#### Главный редактор А. Ф. Зеньков

#### Редакционная коллегия:

д. в. н., проф. П. Г. Бродский (заместитель главного редактора), д. т. н. П. И. Малеев (научный редактор); к. г.-м. н. И. Ю. Бугрова (редактор); к. в. н. В. Ю. Бахмутов (ответственный за выпуск); д. т. н., профессор Э. С. Зубченко, д. в. н., проф. А. И. Исмаилов; д. в. н., проф. В. А. Катенин; к. т. н. Н. И. Леденёв; д. т. н. С. И. Мастрюков; д. т. н., проф. Н. Н. Неронов; акад. РАН В. Г. Пешехонов; чл.-кор. РАН А. И. Сорокин; д. т. н., профессор К. Г. Ставров; к. т. н. В. А. Титлянов; к. т. н. А. М. Шарков; д. ф.-м. н., профессор Г. Г. Щукин

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук»

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

© Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт» 2017

## THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC INSTITUTE

## **NAVIGATION AND HYDROGRAPHY**

PUBLISHED SINCE 1995

47 2017

#### **RUSSIAN FEDERATION MINISTRY OF DEFENCE**

Saint-Petersburg

## Editor-in-chief A. Zenkov

#### **Editorial board**

P. Brodsky, DSc, professor (vice-editor-in-chief);
P. Maleyev, DSc (science editor); I. Bugrova (editor), CandSc;
V. Bakhmutov (the issue manager), CandSc;
E. Zubchenko, DSc, professor; A. Ismailov, DSc, professor;
V. Katenin, DSc, professor; N. Ledenev, CandSc; S. Mastryukov, DSc;
N. Neronov, DSc, professor; V. Peshekhonov, DSc, Acad. RAS;
A. Sorokin, DSc, CM RAS; K. Stavrov, DSc, professor; V. Titlyanov, CandSc;
A. Sharkov, CandSc; G. Shchukin, DSc, professor

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

### СОДЕРЖАНИЕ

#### навигация

Новый алгоритм обработки результатов координирования донных маяков-ответчиков. К. А. Виноградов, И. В. Дьяков	7
Малогабаритный ядерно-прецессионный датчик с компенсацией электрических помех. В. А. Бледнов, В. В. Бледнов	13
Перспективы применения средств оптической локации для определения местоположения автономного необитаемого подводного аппарата. С. П. Ширшнёв	23
ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ	
Международное сотрудничество по гидрографическим исследованиям в Арктике: теория и практика. К. Г. Ставров	33
Количественный метод определения заносимости акватории. А. М. Абрамов	42
Метод кластеризации вертикального распределения скорости звука в океане. Ю. Н. Жуков	47
О возможных путях совершенствования средств и способов исследования акватории по результатам анализа патентной информации. В. П. Леньков, А. Б. Фёдоров, В. В. Чернявец	54
гидрометеорология	
Современные пространственно-временные тенденции изменения глобальной температуры воздуха Северного полушария. Т. Н. Задорожная, В. П. Закусилов.	60
Вероятностная модель специализированной системы гидрометеорологического обеспечения. А. А. Борисов, Ю. В. Кулешов, А. Б. Маков	67
Метод сжатых измерений – на службу гидрометеорологического обеспечения Военно-Морского Флота. Ю. Н. Жуков	73
Повышение достоверности приема эхосигнала при определении высоты нижней границы облаков. А. В. Дёмин, Е. А. Селёдкина	85
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	93
DEMEDATLI	06

#### CONTENTS

#### **NAVIGATION**

Algorithm of Processing the Results of the Bottom Transponders Co-ordination. K. A. Vinogradov, I. V. Dyakov	7
Small-size Nuclear-Precession Sensor with Compensation for the Electric Noise. V. A. Blednov, V. V. Blednov	13
Prospects for Employment of Optical Location Aids to Fix the Position of Autonomous Underwater Vehicle. S. P. Shirshnev	23
HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY	
International Co-operation for Hydrographic Explorations in the Arctic: Theory and Practice. K. G. Stavrov	33
Quantitative Method of Determining the Sediment Accumulation in the Water Area. A. M. Abramov	42
Method of Clusterisation of the Vertical Sound Velocity in the Ocean. Y. N. Zhukov	47
On Possible Ways to Improve the Means and Methods of Exploration of the Water Area Using the Results of the Patent Information. V. P. Lenkov, A. B. Fedorov, V. V. Chernyavets	54
HYDROMETEOROLOGY	
Modern Space-Time Trend Changes in Global Air Temperature of the Northern Hemisphere. T. N. Zadorozhnaya, V. P. Zakusilov	60
Probabilistic Model of Special-Purpose System of Hydrometeorologic Support. A. A. Borisov, Y. V. Kuleshov, A. B. Makov	67
Method of Compressed Measurements to Provide the Hydrometeorologic Support for the Navy. Y. N. Zhukov.	73
Increasing the Reliability of Reseption of an Echo Signal at Determination of Height of the Lower Bound of Clouds. A. V. Demin, E. A. Seledkina	85
INFORMATION ABOUT AUTHORS	93
ABSTRACTS	96

### НАВИГАЦИЯ

УДК 627.921

#### НОВЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ КООРДИНИРОВАНИЯ ДОННЫХ МАЯКОВ-ОТВЕТЧИКОВ

К. А. ВИНОГРАДОВ, И. В. ДЬЯКОВ

(АО «Аквамарин»)

Рассматриваются полученные на основе экспериментальных данных результаты расчета координат донных маяков-ответчиков (ДМО) по известному и вновь разработанному алгоритмам. Показано, что предлагаемый алгоритм обеспечивает большую точность координирования ДМО и дает более устойчивые оценки полученных координат при различной геометрии расположения точек привязки относительно ДМО.

Донные маяки-ответчики используются в навигационных гидроакустических системах (НГС), предназначенных для определения координат подводных объектов, обеспечения аварийно-спасательных, геологоразведочных, добычных и других аналогичных работ. При этом погрешность определения географических координат морских подвижных объектов (МПО), на которых установлена бортовая аппаратура НГС, во многом зависит от погрешности координирования ДМО после их постановки на грунт.

В настоящее время в ВМФ для решения задачи координирования ДМО используется метод многократного определения дистанции между ДМО и обеспечивающим судном (судном-постановщиком ДМО) из нескольких (как правило, не более трех) точек привязки (ТП), располагаемых по возможности симметрично относительно точки сброса ДМО с судна. При каждом цикле измерения дистанции фиксируются координаты судна, например, по данным навигационной аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем (НАП СНС). По этим данным при каждом новом измерении дистанции рассчитываются координаты ДМО, т. е. реализуется метод определения координат по двум (n=2) дальномерным линиям положения с последующим осреднением по общему числу измерений. Для обработки результатов координирования ДМО в инструкции [1] предложен алгоритм, разработанный в 1970-х гг. При этом на момент его разработки требования к точности определения географических координат ДМО составляли несколько десятков метров, что, вероятно, не требовало от разработчиков алгоритма оценки тонкой структуры составляющих полной погрешности его координирования.

Нетрудно показать [2], что радиальная погрешность (при нормальном законе распределения) определения координат ДМО при N измерениях дальности D по алгоритму из инструкции [1] определяется выражением (в предположении равенства погрешностей  $\sigma D$  измерения D и углов  $\alpha_i$  пересечения линий положения):

$$M_{n=2} = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \frac{\sigma D}{\sin \alpha_i} \approx \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \frac{D \cdot \sigma D}{V \cdot \Delta t},$$
 (1)

где D — дальность до ДМО; V — скорость судна (его дрейфа);  $\Delta t$  — допустимый интервал времени запроса (определяется техническими характеристиками ДМО и составляет, как правило, 60 с).

В новом алгоритме обработки результатов координирования предлагается единичные координаты ДМО определять по «тройке» дальномерных линий положения, измеренных из ТП дальностей до ДМО, с оцениванием и дальнейшим исключением неучтенной систематической погрешности (например, за скорость звука, значения задержки выработки ДМО ответного сигнала и т. п.) и последующим осреднением по общему числу «троек». Каждая i-ая (i от 1 до N/3) «тройка» дальномерных линий положения образуется по результатам измерений в каждой ТП.

Нетрудно показать [2], что радиальная погрешность определения координат ДМО при N измерениях дальности D по новому алгоритму при принятых допущениях определяется выражением:

$$M_{n=3} \approx \sqrt{\frac{6}{(n-1)\cdot N}} \cdot \frac{\sigma D}{\sin \alpha_{\rm cp}},$$
 (2)

где n — количество линий положения;  $\sin \alpha_{\rm cp}$  — средний угол пересечения линий положения. При n=3 из (2) имеем:

$$M_{n=3} \approx \sqrt{\frac{3}{N}} \cdot \frac{\sigma D}{\sin \alpha_{\rm cp}}$$
 (3)

Из выражений (1) и (3) получаем:

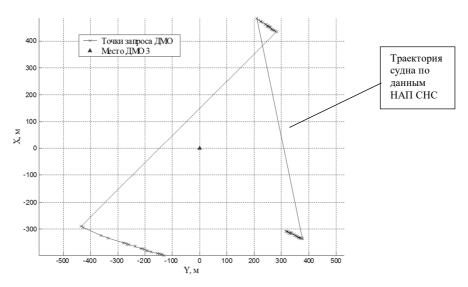
$$\frac{M_{n=2}}{M_{n=3}} = \frac{0.81 \cdot D \cdot \sin \alpha_{\rm cp}}{V \cdot \Delta t} \,. \tag{4}$$

Предположим, что D=500 м,  $\alpha_{\rm cp}=120^\circ$ , V=1 м/с и  $\Delta t=60$  с. Тогда из выражения (4) получаем, что радиальная погрешность определения координат ДМО, найденная при использовании нового алгоритма, примерно в шесть раз меньше, чем аналогичная погрешность, полученная при использовании алгоритма из инструкции [1].

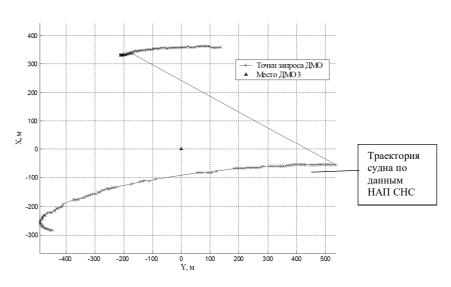
Для подтверждения данной оценки были использованы результаты, полученные при координировании одного из выставленных на грунт ДМО.

В ходе этих работ в море на глубине около 200 м был размещен ДМО, координирование которого проводилось в дрейфе судна-постановщика дважды с интервалом в трое суток. В обоих случаях использовалась навигационная аппаратура потребителей спутниковых навигационных систем (НАП СНС) GP-35 фирмы Furuno (Япония) без приемника дифференциальных поправок. Естественно, за это время измени-

лись условия координирования (в первую очередь ветровой дрейф судна), что иллюстрируется траекториями движения судна при координировании (рис. 1a,  $\delta$ ). При этом, безусловно, и в том и в другом случае перед координированием с помощью гидрологического зонда ОЛД-1, обеспечивающего на каждом горизонте измерение скорости звука со средней квадратической погрешностью (СКП) 0,2 м/с [3], определялся реальный вертикальный разрез скорости звука (ВРСЗ), который учитывался при вычислении дальностей до ДМО.



19 сентября (20 циклов измерения дистанции до ДМО в каждой ТП)



22 сентября (71 цикл измерения дистанции до ДМО в каждой ТП)  $\delta$ 

Рис. 1. Расположение ТП при координировании ДМО. Объяснения в тексте

Данные, характеризующие результаты расчета координат ДМО с использованием алгоритма из инструкции [1], приведены в табл. 1.

Таблица 1
Результаты координирования ДМО по алгоритму из «Инструкции по оборудованию районов маяками-ответчиками навигационных гидроакустических систем» [1]

	Координаты ДМО		Погрешность координирования			Смещение	
Дата	широта, сев	долгота, вост.	а, м	<i>b</i> , м	М, м	τ, град	координат ДМО3, м
19.09	66°16,504'	34°21,288'	1,71	2,38	2,93	90	0
22.09	66°16,506'	34°21,279'	2,15	2,03	2,92	0	7,74

Анализ приведенных в табл. 1 данных показывает, что предложенный в инструкции [1] алгоритм дает в этом случае существенное смещение координат ДМО. Поэтому целесообразно оценить полученные результаты по критериям равноточности и стабильности.

В руководстве [2] показано, что результаты определения навигационных параметров (в нашем случае – координат ДМО) являются:

- равноточными при выполнении условия  $(m_1/m_2)$ 2 <  $F\alpha$ , где  $m = (a^2 + b^2)^{1/2}$  СКП определения навигационного параметра;  $F\alpha$  коэффициент, зависящий от числа N определений навигационного параметра (при N > 20  $F\alpha = 2,2$ );
- стабильными при выполнении условия  $\Delta U < m_{\text{мин}} t\alpha / [N_1 N_2/(N_1 + N_2)]^{1/2}$ , где  $\Delta U$  смещение навигационного параметра;  $N_1$  и  $N_2$  число определений навигационного параметра в двух сериях измерений;  $t\alpha$  коэффициент, зависящий от числа  $(N_1$  и  $N_2)$  определений навигационного параметра (при  $N_1 > 20$  и  $N_2 > 20$   $t\alpha = 2,76$ ).

По данным табл. 1 имеем:

 $(m_1/m_2)^2 = 1,02 < F\alpha = 2,2$  и  $m_{\text{мин}}$   $t\alpha / [N_1 N_2/(N_1 + N_2)]^{1/2} = 2,05 < 7,74$  м, т. е. результаты определения по алгоритму из инструкции [1] координат ДМО 19 и 22 сентября являются равноточными, но нестабильными.

Результаты расчета координат ДМО по новому алгоритму приведены в табл. 2, а сравнительные результаты оценки погрешности координат ДМО по алгоритму [1] и новому алгоритму — на рис. 2.

Таблица 2 Результаты координирования ДМО по новому алгоритму

	Координ	аты ДМО	Погрешность координирования			Смещение	
Дата	широта, сев	долгота, вост.	а, м	<i>b</i> , м	М, м	τ, град	координат ДМО3, м
19.09	66°16,505'	34°21,285'	0,78	0,52	0,94	114,9	0
22.09	66°16,505'	34°21,284'	0,67	0,27	0,72	116,1	0,48

По данным табл. 2 имеем:

 $(m_1/m_2)^2=1,31 < F\alpha=2,2$  и  $m_{\text{мин}}t_\alpha$  /  $[N_1N_2/(N_1+N_2)]^{1/2}=0,51>0,48$  м, т. е. результаты определения координат ДМО по новому алгоритму 19 и 22 сентября являются равноточными и стабильными.

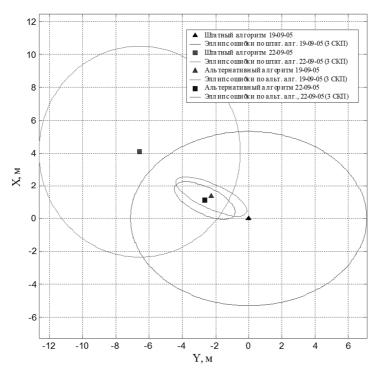


Рис. 2. Сравнительные результаты оценки погрешности координат ДМО по алгоритму из «Инструкции по оборудованию районов маяками-ответчиками навигационных гидроакустических систем» [1] и новому алгоритму

Таким образом, анализ полученных данных показывает, что вновь разработанный алгоритм обработки результатов координирования позволяет в реальных условиях уменьшить примерно в три раза погрешность определения координат ДМО, что достаточно хорошо коррелирует с приведенной ранее теоретической оценкой. Кроме того, новый алгоритм более устойчив к оценке координат при различной геометрии расположения ТП относительно ДМО.

Помимо этого, новый алгоритм (по сравнению с алгоритмом из инструкции [1]) позволяет (судя по данным табл. 1, 2) уменьшить погрешность определения координат ДМО при увеличении числа измерений дистанции из каждой ТП, что характеризуется также данными табл. 3.

Таблица 3 Зависимость СКП определения координат ДМО от числа измерений дистанции

	СКП определения координа				
Дата ( <i>N</i> )	по алгоритму из инструкции [1]	по новому алгоритму			
19.09 ( <i>N</i> =20)	2,93	0,94			
20.09 ( <i>N</i> =71)	2,96	0,72			

Исходя из данных табл. 3 можно оценить максимально необходимое число N измерений дистанции с точки зрения минимизации погрешности определения коор-

динат ДМО. Известно [4], что при увеличении (до определенного предела) числа N измерений изменение СКП m описывается выражением  $(m_2/m_1) = (N_1/N_2)^{1/2}$ . В нашем случае  $(m_2/m_1) = 0,77$ , что при  $N_1 = 20$  дает значение  $N_2 \approx 35$ . Следовательно, увеличение числа измерений дальности до ДМО в каждой ТП более N = 35 практически не приводит к уменьшению погрешности определения координат ДМО.

Таким образом, анализ полученных экспериментальных данных показал, что предложенный алгоритм обеспечивает большую точность координирования ДМО и дает более устойчивые оценки полученных координат при различной геометрии расположения ТП относительно ДМО.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Инструкция по оборудованию районов маяками-ответчиками навигационных гидроакустических систем. № 9170. Л.: ГУНиО МО СССР, 1984. (адм. № 9170). 52 с.
- 2. Практическое кораблевождение для командиров кораблей, штурманов и вахтенных офицеров. Кн. первая. № 9035.1 / Отв. ред. А. П. Михайловский. – Л.: ГУНиО МО СССР, 1988. – 896 с.
- 3. Зонд гидрологический ОЛД-1. Руководство по эксплуатации ВТИГ 1.570.004 РЭ.— ЗАО «НПП «Марс». 2002.-152 с.
- 4. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов измерений. М: «Наука». 1970. 104 С.

## ALGORITHM OF PROCESSING THE RESULTS OF THE BOTTOM TRANSPONDERS CO-ORDINATION

#### K. A. Vinogradov, I. V. Dyakov («Aquamarin» JSC)

The results of calculating the bottom transponder co-ordinates by the known and newly developed algorithms are considered. These results were based on the experimental data. It is shown that the proposed algorithm provides a higher accuracy of co-ordinating the bottom transponder and more stable evaluation of the obtained co-ordinates with various geometry of fixing points relative to the bottom transponder.

УДК 621.3.083:621.317.42

#### МАЛОГАБАРИТНЫЙ ЯДЕРНО-ПРЕЦЕССИОННЫЙ ДАТЧИК С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОМЕХ

**В. А. БЛЕДНОВ, В. В. БЛЕДНОВ** (СП6Ф ИЗМИРАН)

В статье рассмотрен принцип создания ядернопрецессионного датчика, способного работать в качестве модульного прибора как на борту ферромагнитного судна, так и в обсерватории. Его устойчивость к электрическим помехам увеличена в несколько сотен раз. Приведены результаты испытаний как в лабораторных условиях, так и на борту ферромагнитного судна. Созданный датчик, дополняя метод определения угловых компонент (МОУК), может быть использован на борту движущихся объектов для измерения одной из силовых компонент вектора магнитной индукции. Электромагнитная система разработанного датчика позволяет использовать его для измерения компонент вектора магнитной индукции.

Ядерно-прецессионный датчик (в дальнейшем – датчик) является прибором, с помощью которого определяют модуль вектора магнитной индукции (ВМИ), например, поля Земли. Благодаря тому, что измеряется частота свободной прецессии магнитных моментов протонов, его измерения носят абсолютный характер. Важнейшими свойствами датчика являются:

- точность, быстродействие и отсутствие дрейфа нуля;
- малые габариты и минимальные требования к ориентации относительно измеряемого магнитного поля.

Благодаря им он получил широкое распространение при выполнении магнитометрических измерений, в том числе, в атмосфере и в морских условиях. Напряженность магнитного поля H, которая измеряется датчиком, определяется отношением частоты парамагнитного ядерного резонанса  $\omega$  к гиромагнитному отношению (отношение магнитного и механического моментов протона)  $\gamma$ :  $H = {}^{\omega}/_{\gamma}$  [1, 2]. Результат измерений определяется в mecnax.

Недостаток датчика состоит в том, что сигнал ядерной прецессии крайне мал. К тому же он снимается с индукционной катушки, которая, являясь антенной, чувствительна к электрическим помехам как индукционного характера, так и возникающих за счет емкостных связей. Обычно для их подавления используют заземленный металлический экран. Однако при таком решении металлический экран имеет значительные размеры, и датчик крайне неудобен в эксплуатации.

Чтобы понять физические процессы, сопровождающие генерацию полезного сигнала, рассмотрим работу датчика в металлическом экране. Его схема приведена на рис. 1 (1 – объем с протоносодержащей жидкостью; 2 – катушка поляризации; 3 – металлический экран;  $\mathbf{B}_{\mathrm{T}}$  – измеряемое поле;  $\mathbf{B}_{\mathrm{p}}$  – поле поляризации).

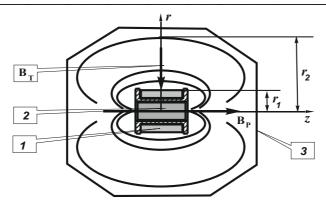


Рис. 1. Конструкция ядерно-прецессионного датчика. Объяснения в тексте

При измерении магнитного поля катушка поляризации подключается к источнику тока (рис. 2; момент 0), создающего поле поляризации  ${\bf B}_p$ , которое должно быть значительно больше измеряемого поля  ${\bf B}_T$ . Полученное суммарное поле  ${\bf B}_\Sigma \cong {\bf B}_p + {\bf B}_T$  создает ансамбль одинаково ориентированных намагниченных протонов.

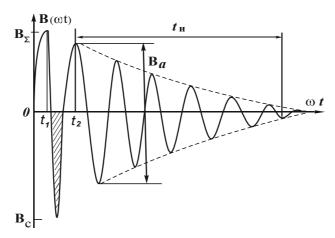


Рис. 2. К принципу работы ядерно-прецессионного датчика. Объяснения в тексте

Когда протоны приобретают намагниченность  $\mathbf{B}_{\Sigma}$  (время), поле  $\mathbf{B}_{\mathrm{p}}$  выключается, и в катушке 2 возникает ток самоиндукции, генерирующий поле самоиндукции  $\mathbf{B}_{\mathrm{C}}$ , сравнимое с полем  $\mathbf{B}_{\Sigma}$ . Процесс измерения частоты прецессии  $\omega$  начинается с момента  $t_1$  и длится до исчезновения сигнала (длительность  $t_{\mathrm{u}}$ ).

Объем пространства, в котором образуется поле самоиндукции  ${\bf B}_{\rm C}$ , определяется радиусом  $r_2$ , который равен:  $r_2 \approx (10$ – 15)  $r_1$ , где  $r_1$  — радиус катушки поляризации (рис. 1). Если в пределах действия поля  ${\bf B}_{\rm C}$  находится металлический экран, то в нем генерируется ток, создающий магнитное поле экрана  ${\bf B}_3$ . Оно дезориентирует организованный ансамбль протонов, и амплитуда полезного сигнала резко снижается. Чтобы исключить влияние поля экрана необходимо создать такую конструкцию катушек, при которой поле самоиндукции  ${\bf B}_{\rm C}$  существовало в строго ограниченном пространстве. Тогда даже в экране малых размеров поля  ${\bf B}_3$  не возникнет.

Эти условия и определили выбор решения поставленной задачи: совместить в одной конструкции две встречно включенные сфероидальные электромагнитные катушки (рис. 3).

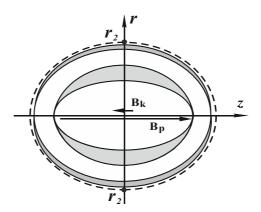


Рис. 3. Схема электромагнитной системы датчика. Объяснения в тексте

Катушки последовательно соединены с источником питания. При включении тока в объеме с протоносодержащей жидкостью образуются два встречно направленных поля: поле катушки поляризации  ${\bf B}_{\rm p}$  и поле катушки компенсации  ${\bf B}_{\rm k}$ . Основные требования, которые должны быть выполнены, состоят в следующем. В точках с координатами  $r=\pm r_2,\ z=0$  суммарное поле  ${\bf B}_{\Sigma}$  должно быть равно нулю  $({\bf B}_{\rm p}+{\bf B}_{\rm k}=0),\$ а в точке с координатами  $r=0,\ z=0,\$ величина поля, исходя из практических соображений, должна лежать в пределах:  ${\bf B}_{\Sigma}\cong (100-200){\bf B}_{\rm T},$  где  ${\bf B}_{\rm T}-$  измеряемое поле.

В момент выключения тока в металлическим экране генерируется поток электромагнитной индукции  $\phi_{\Sigma}$ , равный:  $\phi_{\Sigma} = \phi_p + \phi_k$ . Если  $\phi_{\Sigma} = 0$ , то и магнитное поле экрана  $\mathbf{B}_{\mathfrak{g}}$  равно нулю ( $\mathbf{B}_{\mathfrak{g}} = 0$ ). В этом случае выполняются все условия, определяющие возможность получения сигнала ядерной прецессии.

Витки каждой катушки необходимо расположить на замкнутой поверхности второго порядка (сфера, вытянутые сфероиды). Намотка витков выполняется так, чтобы количество ампер-витков на единицу длины было одинаково. В такой сфероидальной электромагнитной системе магнитное поле рассеяния можно скомпенсировать по всей внешней поверхности, при этом в каждом элементарном объеме протоносодержащей жидкости поле поляризации будет однородным. Подобные условия способствуют получению максимального сигнала [3].

Вторая задача состояла в том, чтобы конструкция датчика могла быть реально изготовлена (рис. 4).

Особенность принятого решения состояла в том, чтобы катушка поляризации была ограничена симметрично расположенными плоскостями с координатами:  $|z_1|=\pm(a_1-h_1)$ , где  $a_1$  – полуось катушки поляризации;  $h_1$  – размер, ограничивающий ее. Катушка компенсации также ограничивается плоскостями, определяемыми координатами:  $|z_2|=\pm(a_2-h_2)$ , где  $a_2$  – полуось катушки компенсации;  $h_2$  – размер, ограничивающий ее. Внутренние радиусы катушек поляризации и компенсации соответственно равны  $r_p$  и  $r_k$ .

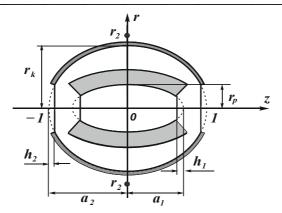


Рис. 4. Схема электромагнитной системы датчика. Объяснения в тексте

Координаты точек, в которых рассчитывается поле самоиндукции, определены координатами:  $r=\pm r_2,\ z=0$ . Из практических соображений величину  $r_2$  зададим следующим образом:  $r_2=r_k+0.1r_2$ . Подобное ограничение эллипсоидальных катушек усложняет вычисления, зато позволяет достаточно точно рассчитать реальную конструкцию электромагнитной системы датчика.

При расчетах полагали, что катушка поляризации имеет несколько слоев обмотки (порядка десяти), образованных плотно уложенными витками. В этом случае создаваемое ею поле будет иметь достаточную величину. У катушки компенсации, имеющей больший радиус, количество слоев может быть значительно меньше (порядка двух). При этих условиях результирующее поле поляризации уменьшится на величину, составляющую не более 10 % от поля катушки компенсации.

Так как в соответствии с теоремой Стокса магнитный поток  $\phi_{\Sigma}$ , проходящий через замкнутый контур радиусом  $r_2$ , равен:  $\phi_{\Sigma} = \oint \mathbf{A}_{r_2} d r$ , то был использован метод вычисления вектора-потенциала  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ ). В соответствии с задачей, изменение индукции суммарного магнитного поля  $\mathbf{B}_{\Sigma}(r)$  и функции вектора-потенциала  $\mathbf{A}_{\Sigma}(r)$  должно соответствовать закономерностям, приведенным на рис. 5.

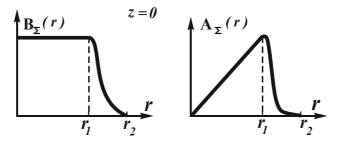


Рис. 5. Распределение магнитного поля  ${\it B}_{\Sigma}$  и вектора-потенциала  ${\it A}_{\Sigma}$  в зависимости от радиуса r. Объяснения в тексте

Так как задача имеет осевую симметрию и симметрию относительно плоскости z=0, то проводился поиск решения, при котором в точках с координатами  $r=\pm r_2,$  z=0

поле самоиндукции  ${\bf B}_{\rm C}$  электромагнитной системы было равно нулю ( ${\bf B}_{\rm C}=0$ ). Затем,

используя разложение в ряд Тейлора [4, 5] до шестой производной  $\left(\frac{\partial^6 \mathbf{A}_{\phi}}{\partial z^2 \partial r^4}\right)$ 

рассчитывалось распределение поля вдоль поверхности  $\mathbf{S}(r,z)$  до точки с координатами r=0, z=1 (рис. 6). Рассчитав поле катушек в плоскости, проходящей через ось электромагнитной системы, получим общую картину на всей поверхности  $\mathbf{S}(r,z)$ .

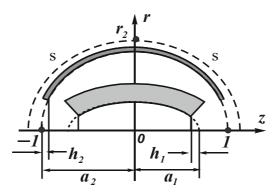


Рис. 6. Схема расположения поверхности S относительно электромагнитной системы датчика. Объяснения в тексте

Уравнение, определяющее значение функции вектора-потенциала суммарного магнитного поля в точках с указанными координатами, имеет вид [3]:

$$\begin{split} \mathbf{A}_{\Sigma}(r,z) &= \mathbf{A}_0 \ \Big\{ \! \sum_{1}^{n} K_1 \left[ \int_{0}^{\gamma_1} \Phi_{1l}(z) + \int_{-\gamma_1}^{0} \Phi_{1l}'(z) \right] - \sum_{1}^{m} K_2 \ \left[ \int_{0}^{\gamma_2} \Phi_{2l}(z) + \int_{-\gamma_2}^{0} \Phi_{2l}'(z) \right] \! \Big\}, \end{split}$$

где  $K_1$ ,  $K_2$  — постоянные коэффициенты;  $\Phi_{1l}(z)$ ,  $\Phi'_{1l}(z)$ ,  $\Phi_{2l}(z)$ ,  $\Phi'_{2l}(z)$  — функции, зависящие от положения каждого кольца электромагнитной системы относительно конкретной точки, в которой вычисляется поле. Важным фактором, определяющим возможность компенсации поля эллипсоидальной системы, является величина  $h_2$ , определяемая при конкретном значении  $h_1$ . Параметр  $h_1$  изначально неизвестен, поэтому при расчетах использовался метод последовательных приближений.

В плоскости, проходящей через ось электромагнитной системы, были выполнены численные расчеты по определению распределения поля в зависимости от координаты z. На рис. 7 приведен один из примеров построенных графиков функции вектора-потенциала  $\mathbf{A}_{\Sigma}(z)$ , рассчитанной при различных геометрических параметрах электромагнитной системы. Построена также и функция изменения векторапотенциала  $\mathbf{A}_{\mathrm{D}}(z)$ , создаваемого *только катушкой поляризации*.

Такой способ расчета позволил определить параметры искомой электромагнитной системы. Поле, создаваемое на поверхности  $\mathbf{S}(r,z)$ , по сравнению с полем, создаваемым на ней же только внутренней катушкой, уменьшено на три порядка.

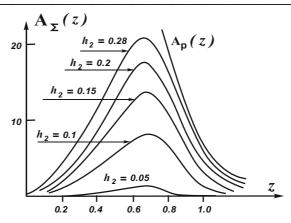


Рис. 7. Результаты расчета вектора-потенциала для электромагнитных систем с разными параметрами. Объяснения в тексте

После выполнения теоретических исследований был построен действующий макет датчика, в котором влияние электрических помех на полезный сигнал исключено. На рис. 8 приведена его схема: 1 — сосуд с протоносодержащей жидкостью; 2 — катушка поляризации; 3 — катушка компенсации; 4 — металлический экран.

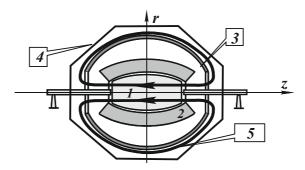


Рис. 8. Схема лабораторного образца разработанного датчика. Объяснения в тексте

На этом же рисунке показано и распределение суммарного магнитного поля, создаваемого электромагнитной системой датчика внутри экрана (позиция 5). Фотографии макета изготовленного датчика приведены на рис. 9–11.



Рис. 9. Общий вид датчика



Рис. 10. Катушки поляризации и компенсации



Рис. 11. Металлический экран

В дальнейшем все лабораторные и натурные исследования выполнялись с помощью изготовленного макета, подключенного к резонансному усилителю, конструкция которого давала возможность перенастраивать резонансные контуры на требуемую частоту.

Количественная оценка воздействия электромагнитных помех на изготовленный датчик проверялась в магнитно-ионосферной обсерватории (пос. Воейково). Датчик устанавливался в немагнитном павильоне на расстоянии 1,5 м от индукционной катушки, подключенной к генератору. Во время эксперимента генератор работал на резонансной частоте настроенного усилителя (порядка 1400 Гц). Сначала при отключенной катушке компенсации и без металлического экрана определялся уровень помех, наводимых на катушку поляризации. Затем восстанавливалась вся конструкция датчика и при тех же условиях осуществлялась регистрация полезного сигнала.

Исследования показали, что у изготовленного датчика защита от электрических помех увеличилась в несколько сотен раз. Дополнительная проверка показала, что датчик устойчиво работает практически в любых помещениях (в лабораториях, промышленных цехах).

Натурные исследования, направленные на оценку возможности работы датчика на ферромагнитном судне, были выполнены в Тихом океане на судне водоизмещением в 5000 т. Датчик подвешивался на фале (рис. 12).

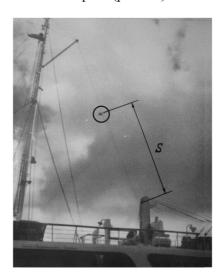


Рис. 12. Расположение датчика на ферромагнитном судне

Вначале опыты проводились только с катушкой поляризации, которая через усилитель подключалась к осциллографу. Коэффициент усиления осциллографа изменялся в 10, в 100 и в 1000 раз. Ниже приведены фотографии помех, снятых с экрана. На рис. 13a показан обычный уровень помех  $U_{\rm on}$ , существующий в этой точке. На рис. 136 — уровень помех  $U_{\rm nn}$  при включении различных корабельных передатчиков.

После восстановления системы защиты от помех установлено, что степень компенсации электрических помех возросла в 300—400 раз. В этом случае сигнал ядерной прецессии был устойчив, и сбоев в работе датчика практически не наблюдалось. Так у изготовленного датчика была выполнена оценка степени компенсации электрических помех.

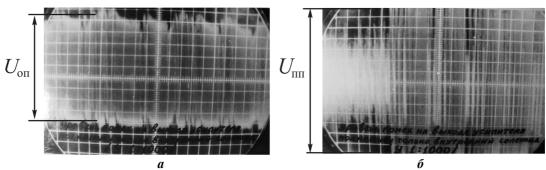


Рис. 13. Характер электромагнитных помех в точке работы датчика. Объяснения в тексте

Для объективной оценки параметров полезного сигнала, снимаемого с изготовленного датчика в условиях, существующих на борту судна, двумя датчиками были проведены одновременные измерения магнитного поля Земли. Изготовленный датчик был установлен на борту судна, а другой, имеющий тороидальную катушку поляризации, находился в буксируемой гондоле. На рис. 14a приведены результаты измерений в буксируемой гондоле, а на рис. 14b — на борту судна. Как видно, параметры сигналов от обоих датчиков практически одинаковы.

Следует учитывать еще один немаловажный факт. В буксируемой гондоле датчик был в четыре раза больше датчика, установленного на судне. Следовательно, при прочих равных условиях, использование сфероидальных электромагнитных систем дает возможность в несколько раз увеличить амплитуду снимаемого ядернопрецессионного сигнала.

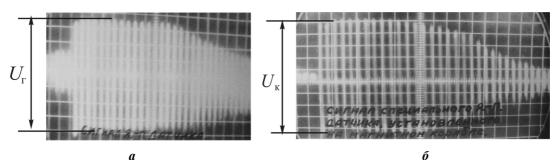


Рис. 14. Сигналы буксируемого датчика (а) и датчика, работающего на борту судна (б)

С помощью разработанного датчика, установленного на борту ферромагнитного судна, была выполнена маршрутная съемка модуля вектора индукции суммарного магнитного Земли (сумма собственного поля судна и поля Земли). Результаты измерений, выполненные вдоль маршрута следования судна, приведены на рис. 15. На нем отмечен только характер изменения сигнала, абсолютные величины магнитного поля Земли не приведены. Оценивая работу датчика, можно констатировать, что полезный сигнал фиксировался устойчиво. Видно, что при движении судна вдоль магнитного меридиана средний уровень суммарного магнитного поля сохраняется. Разброс единичных показаний менялся от сотни до многих сотен нанотесла. Существующий тренд зависит от изменения магнитного поля Земли и уровня намагниченности ферромагнитных масс судна.

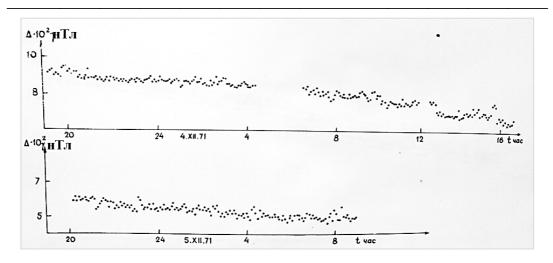


Рис. 15. Результаты измерений модуля вектора магнитной индукции поля Земли, выполненные на ферромагнитном судне

Предлагаемая конструкция датчика может быть снабжена устройством, позволяющим ему работать и в неоднородных магнитных полях. Эта особенность значительно увеличивает область его использования для объективного контроля уровня измеряемого магнитного поля на различных движущихся объектах. В частности, использование его для контроля модуля вектора магнитной индукции поля Земли на борту ферромагнитного судна, что существенно дополняет метод определения угловых компонент [6–8]. Создание такого единого комплекса позволит начать исследования по решению проблем, обозначенных в работах [9, 10].

Необходимо отметить, что и в условиях обсерваторий или других наземных измерений для определения абсолютных значений модуля и компонент магнитного поля Земли крайне целесообразно использовать датчики, в которых осуществляется компенсация электрических помех. Точность и надежность измерений увеличивается во много раз. В настоящее время практически во всех обсерваториях используются различные методы компенсации электрических помех. Однако они далеко не совершенны, как, например, в магнитно-ионосферной обсерватории, расположенной в пос. Воейково, Ленинградская обл. При использовании же разработанных датчиков, во-первых, значительно упрощается настройка измерительных приборов, а вовторых, существенно снижаются требования к квалификации обслуживающего персонала.

#### Выводы

- 1. Разработанный ядерно-прецессионный датчик, в несколько сот раз компенсируя электрические помехи, практически полностью исключает их влияние на формирование сигнала ядерной прецессии.
- 2. Датчик прошел проверку на борту ферромагнитного судна, при выполнении измерений показал стабильность и устойчивость работы.
- 3. Разработанная конструкция датчика может быть использована при создании модульных и компонентных приборов, работающих как в стационарных условиях, так и на борту движущихся объектов различных назначений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Савельев И. В. Основы теоретической физики. Т.1. М.: Наука, 1991. С. 493.
- 2. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. С. 463.
- 3. Бледнов В. А. Электромагнитные системы помехозащищенных ядерно-прецессионных датчиков // Геомагнетизм и аэрономия. 1972 с. Т. 12. С. 959–961.
- 4. Бледнов В. А. Разложение магнитного вектор-потенциала, вычисленного для кольца с током // Геомагнетизм и аэрономия. 1970 с. Т. 10. С. 700—704.
- 5. Бледнов В. А. Разложение магнитного вектор-потенциала, вычисленного для кольца с током. (продолжение) // Геомагнетизм и аэрономия. 1972 с. Т. 12. С. 1106–1110.
- 6. Бледнов В. А. Основные принципы определения компонент магнитного поля Земли на движущихся ферромагнитных объектах (основы теории разделения полей // УФН. 1997. Т. 167. Вып. 10. С. 1113–1118.
- 7. Бледнов В. А. Сравнение результатов магнитной съемки акватории, выполненной бортовым и буксируемым магнитометрами // Навигация и гидрография. 2014. № 37. С. 51–58.
- 8. Бледнов В. А., Бледнов В. В. Результаты экспериментальных исследований метода определения угловых компонент магнитного поля Земли на борту ферромагнитного судна // Актуальные проблемы Военной науки и политехнического образования ВМФ. Межведомственная научнотехническая конференция. Сборник статей и докладов, часть 2, Военный Институт (Военно-Морской политехнический ВУНЦ ВМФ («Военно-морская академия» ВМА)) г. Санкт-Петербург, 2015 год. С. 34–42.
- 9. Малеев П. И., Хребтов А. А., Шеремет В. И. Состояние развития и перспективы использования морской бортовой магнитометрической системы // Навигация и гидрография. 2006. № 23. С. 91–97.
- 10. Малеев П. И. Перспективы развития магнитометрических систем для морских подвижных объектов // Навигация и гидрография. 2010. № 29. С. 18–25.

## SMALL-SIZE NUCLEAR-PRECESSION SENSOR WITH COMPENSATION FOR THE ELECTRIC NOISE

#### V. A. Blednov, V. V. Blednov (St. Petersburg Branch of the N. V. Pushkov IZMIRAN)

The principle used to create the nuclear-precession sensor able to operate as a modular device both on board a ferromagnetic vessel and in an observatory, is considered. Its protection against the electric noise has been increased several hundred times. The results of tests carried out in the laboratory and aboard the ferromagnetic vessel are presented. This sensor, as an addition to the method of finding the angular components, can be used on board the moving objects in order to measure one of the force components of the magnetic induction vector. The electromagnetic system of the sensor allows to use it for measurement of the magnetic induction vector components.

УДК 623.46:535

#### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

**С. П. ШИРШНЁВ** (АО «ЦКБ МТ «Рубин»)

Статья посвящена описанию физики распространения оптического излучения в морской среде, а также анализу путей разработки оптических локационных систем и создания с их помощью специальных карт морского дна.

#### Введение

История исследований океанских глубин насчитывает немало ярких страниц. В различные периоды освоения и изучения океанов и морей, шаг за шагом формирующих представление о значительной части нашей планеты, для выполнения работ, всегда трудных и опасных, привлекались наиболее совершенные для каждой эпохи технические средства. Наше время характерно тем, что в морях и океанах начинают активно работать подводные аппараты, в том числе и аппараты-роботы. Хорошо известны выполненные подводными аппаратами работы по оценке состояния дна в местах прокладки кабелей и трубопроводов, по обеспечению установки плавучих нефтегазовых платформ и т. д. [1].

Однако обеспечение практического применения автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) является сложной комплексной технической задачей, которую можно разделить на нескольких более простых. Одной из них является определение местоположения АНПА. В настоящее время не разработаны технические средства, позволяющие АНПА в автономном режиме в погруженном состоянии определять с большой точностью свое место относительно морского дна. Тем не менее бурное развитие электронных систем и комплексов в последнее время позволяет с оптимизмом глядеть на поиски решения данной задачи. При этом отдельное место среди большого набора электронных систем занимают оптические системы, которые с успехом можно будет применять для обеспечения связи с АНПА, а также для освещения обстановки и определения местоположения аппарата.

Создание лазерных линий связи с объектами, находящимися под водой, а также лазерных средств освещения подводной обстановки является приоритетной задачей для развития систем управления и наблюдения в иностранных военно-морских силах. Так, оборонное агентство DARPA подписало контракт с фирмой QinetiQ на создание системы подводной лазерной связи сине-зеленого диапазона. Предполагается, что новое устройство коммуникации будет включено в тактическую информационную сеть TRITON. Кроме того, также по заказу агентства DARPA фирмой Optigrady создан прототип системы освещения подводной обстановки с использованием лазера. При этом по информации иностранной печати дальность обнаружения подводных объектов уже составляет несколько сотен метров.

В Военно-Морском Флоте России работы по созданию оптических средств связи с погруженными объектами проводились ещё в середине восьмидесятых годов прошлого века. Для проверки возможности установления двухсторонней связи была переоборудована подводная лодка проекта 658С К-19 [2]. Предполагалось провести эксперимент по установлению связи между погруженной подводной лодкой и модулем «Квант» международной космической станции «Мир». К сожалению, в силу определенных причин довести работу в то время до логического конца не удалось. Лазерные системы освещения подводной обстановки и определения места в нашей стране никогда не разрабатывались.

В настоящее время лазерные средства освещения обстановки, или, как их подругому называют, средства оптической локации (СОЛ) – активно формирующаяся область науки. Их применение на АНПА позволяет рассчитывать на решение задачи определения местоположения относительно морского дна. Это связано с тем, что СОЛ имеют ряд существенных преимуществ относительно других технических средств, обеспечивающих определения места. К таким преимуществам можно отнести:

- высокую разрешающую способность оптических локационных систем (расстояние между двумя объектами, имеющими одинаковые угловые координаты, будет составлять несколько сантиметров);
- узкую оптическую диаграмму направленности (позволяет определять с точностью до нескольких минут угловые координаты подводных объектов);
- скрытность применения оптических средств определения места АНПА (в отличие от гидроакустических комплексов и систем работу оптических систем невозможно обнаружить).

Однако, кроме перечисленных преимуществ, СОЛ имеют и свои недостатки:

- небольшая дальность действия до нескольких сотен метров (это связано с ограничениями по прохождению электромагнитной энергии в водной среде; световое излучение электромагнитное излучение);
- большая зависимость прохождения световой энергии в водной энергии от физических и химических свойств моря (растворенных и нерастворенных органических и неорганических примесей, что приводит к рассеиванию светового излучения).

Данные плюсы и минусы необходимо учитывать при проектировании оптических локационных систем для обеспечения определения местоположения АНПА относительно морского дна.

## 1. Распространение электромагнитной энергии светового диапазона в водной среде

Определение местоположения АНПА, как было сказано выше, является сложной технической задачей. Для её решения необходимо:

- разработать специальные оптические локационные средства;
- создать цифровые карты морского дна для районов, в которых будет маневрировать АНПА.

Эти две задачи взаимосвязаны – без создания специальных оптических локационных средств невозможно создать цифровые карты морского дна и, наоборот, отсутствие цифровых карт морского дна не обеспечит определение места АНПА даже при наличии на борту специального оптического локационного средства.

Однако до настоящего времени специализированные оптические системы определения места не создавались. Для определения места широко применяются гид-

роакустические комплексы и системы (как находящиеся в составе оборудования АНПА, так и специально установленные в районе его нахождения).

Это связано с особенностями прохождения электромагнитных волн в водной среде. Чем выше частота (короче длина волны) электромагнитного излучения, тем меньше расстояние, которое оно пройдет в водной среде (для СВЧ диапазона она составляет единицы сантиметров). Распространение же звука в море не так сильно зависит от частоты излучения, однако работа гидроакустических средств (ГАС) сильно зависит от гидрологических условий распространения звука в воде. Эти условия бывают и не благоприятными. Поэтому АНПА не всегда может с помощью ГАС определить свое место по маршруту передвижения.

С другой стороны, если провести анализ всего диапазона электромагнитных волн (ЭМВ – от единиц  $\Gamma$ ц до  $10^{20}$   $\Gamma$ ц) на предмет проникновения ЭМВ в водную среду, то можно найти диапазон, в котором обеспечиваются относительно малое затухание. В ней наблюдаются минимальные потери при распространении электромагнитной энергии в воде. На рис. 1 представлена такая область – это так называемое «окно прозрачности».

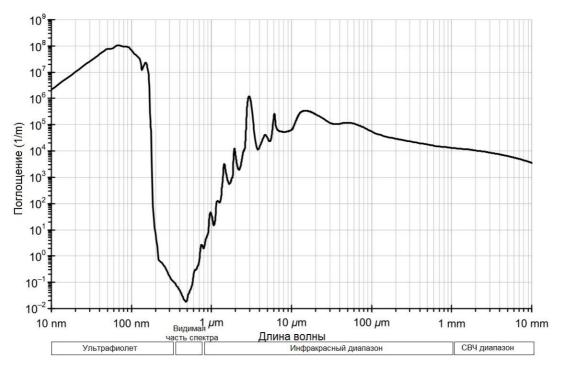


Рис. 1. Зависимость проникающей способности света от длины волны

Как видно из рисунка, такая область относится к видимой части спектра. Проведенные научные исследования подтвердили, что общее световое поле в толще океана изменяется в зависимости от глубины моря.

На глубине 1 см поглощается 15 % всей солнечной энергии. В основном это энергия самых длинных волн инфракрасной части спектра, которая теряется из-за поглощения в поверхностной пленке океана.

На глубине 1 м поглощается 55 % всей энергии, в том числе все инфракрасные волны и значительная часть ультрафиолетовых.

На глубине 10 м поглощается 84% всей энергии. Только волны синего и зеленого света проникают на еще большие глубины.

На глубине 100 м остается только 1% световой энергии, поступающей с поверхности моря. По цвету это остаточный сине-зеленый свет с длинами волн около 472 нм  $-6\cdot 10^{14}$  Гц.

Основываясь на практических исследованиях прохождения света через морскую среду и теоретических расчетах, можно сделать вывод о том, что работа оптических локационных систем наиболее эффективной будет именно в сине-зеленном диапазоне длин волн. Теоретические расчеты проникающей способности лазерного излучения в сине-зеленном диапазоне длин волн приведены в таблице. Расчет произведен по данным из работы [3].

Проникающая способность лазерного излучения сине-зеленного диапазона длин волн

Мощность излучения, Вт	100	200	300	500
Толщина слоя воды, м	100	150	180	210
Диаметр фотоприемника, м	0,2	0,2	0,2	0,2
Мощность, излучения на принимающем детекторе, мВт	0,59	0,93	1,48	2,35

Как видно из таблицы, толщина слоя воды, через которую проходит световое лазерное излучение сине-зеленного диапазона длин волн, зависит от мощности используемого лазера.

Кроме поглощения, ещё одним физическим фактором, который будет оказывать сильное влияние на распространение лазерного излучения оптической системы определения места, будет рассеивание. Свет – это поток фотонов – частиц, обладающих определённой энергией, импульсом, собственным моментом импульса и нулевой массой.

С точки зрения оптики, морская вода представляет собой мутную поглощающую среду. Световой поток (поток фотонов), проникающий в воду и проходящий сквозь толщу воды, будет ослабевать за счет рассеяния (при этом рассеиваться они могут вперед, назад и в любом другом направлении). Это физическое явление связано с прохождением света через неоднородную среду.

Неоднородностями являются взвешенные частицы, вызывающие оптическую неоднородность морской воды. Характер рассеяния света зависит от размеров рассеивающих частиц. Поэтому рассматривают раздельно рассеяние света частицами, имеющими размеры меньше длины волны падающего света, — молекулярное рассеяние, и рассеяние света крупными частицами, соизмеримыми с длиной волны падающего света.

Ослабление энергии светового потока за счет рассеяния зависит от длины волны света  $\lambda$ . Оно обратно пропорционально четвертой степени длины световой волны. Поэтому в воде сильнее всего рассеиваются лучи зеленой и особенно синей части спектра с длиной волны менее 500 нм.

Этот вывод относится к рассеянию света частицами малыми по сравнению с длиной световой волны, т. е. к случаю молекулярного рассеяния. Оно наблюдается тогда, когда в морской воде нет растворенных газов и примесей, находящихся во

взвешенном состоянии. В последнем случае те и другие могут достигать размеров порядка длины световой волны и даже больших и будут вызывать сильное рассеяние света, которое не подчиняется законам молекулярного рассеяния.

Когда размер рассеивающей частицы соизмерим с длиной световой волны, на ее поверхности под воздействием переменного электромагнитного поля, распространяющегося в направлении светового потока, возникают не простые электромагнитные колебания, как в случае молекулярного рассеяния, а сложные. Световой поток, проникший под поверхность моря, рассеивается каждым элементарным слоем воды как вперед, так и назад. Оба эти потока в свою очередь рассеиваются в обе стороны (рассеяние второго порядка). В зависимости от размеров и характера частиц возникают электромагнитные колебания не только второго, но и третьего, четвертого порядков и т. д. Суммарный эффект рассеяния каждым элементарным слоем представляет сложную картину многократного рассеяния световых лучей в толще моря.

В этом случае модуль рассеяния оказывается во много раз больше модуля для молекулярного рассеяния. Поэтому крупные частицы могут вызывать суммарный эффект рассеяния, примерно в 200 раз превышающий эффект молекулярного рассеяния.

В результате совместного эффекта поглощения и рассеяния света с глубиной происходит ослабление светового потока и изменение его спектрального состава, так как показатели поглощения и рассеяния различным образом зависят от длины волны. Длинноволновые лучи (> 600 нм) поглощаются в основном поверхностным слоем толщиной в несколько метров, глубже преобладает рассеянная зелено-синяя часть спектра.

В природе процессы поглощения и рассеяния света действуют одновременно. Поэтому при проникновении света в глубину моря его ослабление будет происходить за счет обоих процессов.

В чистой океанской воде ослабление света минимальное и определяется преимущественно поглощением света. Рассеяние света имеет одинаковый порядок с поглощением только в голубой части спектра (от 300 до 500 нм) с максимумом при длине световой волны 460 нм. При длинах волн более 580 нм доля рассеяния в общем ослаблении света не превышает 1%.

С увеличением замутненности воды, обычно наблюдаемой при подходе к берегу, значение рассеяния в суммарном ослаблении возрастает вследствие наличия в воде крупных взвешенных частиц. Одновременно возрастает и поглощение крупными частицами, что вызывает общее увеличение суммарного ослабления и смещение минимума ослабления в зону более длинных волн.

Зависимость ослабления света от длины волны и наличия примесей должна быть учтена при выборе длины волны оптической локационной системы, предназначенной для определения места АНПА. В настоящее время данные работы в нашей стране не проводятся ни практически, ни теоретически. Однако без их проведения (без определения оптимальной длины волны) невозможно создать ОЛС с характеристиками, обеспечивающими навигационную безопасность плавания АНПА в погруженном состоянии.

Правильный выбор длины волны позволит найти среди всего многообразия вариантов оптических локационных систем систему с оптимальными техническими характеристиками.

#### 2. Принципы построения оптических локационных систем

Как уже было сказано выше, световое излучение представляет собой поток фотонов. Оно является электромагнитным излучением, способным проходить через среду (в данном случае — через воду), а также отражаться от препятствий. Принципы применения электромагнитного излучения светового диапазона в оптических локационных системах идентичны принципам использования электромагнитной энергии СВЧ диапазона в радиолокационных комплексах и станциях (РЛС). Данные технические средства применяются также для определения местоположения морских, наземных и воздушных объектов относительно земной поверхности. Только используются они в воздушном и безвоздушном пространстве. Соответственно, технические характеристики комплексов и систем оптической локации должны быть идентичны техническим характеристикам радиолокационных станций.

Как и в РЛС, сущность активного измерения дальности до морского дна будет сводится к анализу запаздывания отраженного сигнала, прошедшего измеряемое расстояние относительно излученного. При этом могут быть использованы методы, применяемые в обычных радиолокационных станциях:

- импульсный метод измерения времени задержки сигнала (импульсные оптические дальномеры);
- метод измерения измененной фазы полученного отраженного сигнала (фазовые оптические дальномеры).

Устройство импульсных оптических дальномеров идентично импульсным радиолокационным дальномерам [4].

Схема импульсного дальномера представлена на рис. 2.

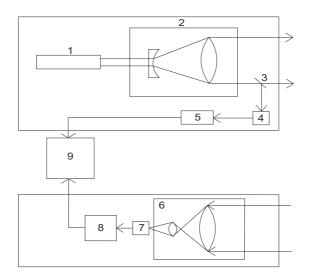


Рис. 2. Схема импульсного оптического дальномера. Объяснения в тексте

Она состоит из передающего и приемного каналов и канала измерения временных интервалов. В передающем канале лазер 1 излучает мощные короткие световые импульсы. Расходимость излучения доводят до необходимой величины с помощью формирующейся оптической системы 2 и направляют на морское дно, расстояние до которого должно быть измерено. Часть оптического излучения с помощью оптического элемента 3 ответвляют и направляют на фотоприемник, на выходе которого

установлен импульсный усилитель 5. Видеоимпульс с выхода усилителя 5 служит в качестве отметки времени, от которой начинается отсчет временного интервала, в течение которого световой импульс лазера распространяется до объекта и обратно. Отраженное дном лазерное излучение, попавшее на вход приемной оптической системы 6, поступает на фотоприемник 7. Видеоимпульсы с его выхода после усиления импульсным усилителем 8 служат в качестве отметки времени, прекращающей отсчет временного интервала в измерителе 9.

Так же, как импульсные оптические дальномеры, фазовые оптические дальномеры имеют устройство, идентичное радиолокационным станциям, работающим на принципе измерения изменения фазы излученного в сторону цели радиолокационного сигнала.

Однако в оптических локационных системах могут быть применены и другие, отличные от радиолокации, методы измерения расстояния до морского дна. К ним относятся интерференционные методы измерения дистанции. Основным их принципом является определение крутизны фазо-частотных характеристик среды распространения светового излучения. При этом используется интерференция монохроматичных излученного и принятого сигналов. К этому классу можно отнести методы, использующие интерференцию модулированных колебаний и интерференцию модулирующих колебаний. В случае применения модулированных колебаний запаздывание отраженного сигнала определяется по специфичным признакам сигнала, являющегося результатом интерференции.

В классическом случае монохроматического излучения в процессе измерений определяется число длин волн лазерного излучения, укладывающихся на измеряемом расстоянии. При изменении стационарных объектов на морском дне определяется количество максимумов или минимумов поля интерференции в точке приема. Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 3.

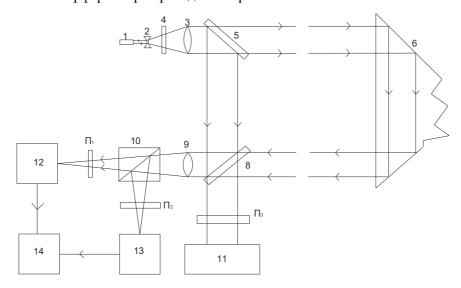


Рис. 3. Схема оптического интерферометра. Объяснения в тексте

Линейно-поляризованное излучение лазера 1 в результате прохождения через четвертьволновую пластину 4, установленную между линзами 2 и 3 формирующей

телескопической системы, приобретает круговую поляризацию и в таком виде направляется на морское дно 6. Излучение опорного и отраженного пучков сводится с помощью полупрозрачных зеркал 5 и 8. Разделение на два канала производится светоделителем 10. Взаимная ориентация осей поляризационных фильтров П1 и П2 со сдвигом на 45° обеспечивает 90-градусный сдвиг по фазе электрических сигналов на фотоприемниках 12 и 13, необходимый для определения расстояния до морского дна. С учетом того, что перемещение АНПА вдоль морского дна на половину длины волны излучения приводит к повороту плоскости поляризации на 180°, этому сдвигу соответствует один период изменения сигнала на выходе каждого фотоприемника.

Любой из рассмотренных вариантов оптических систем определения местоположения может быть использован на АНПА. Однако конкретный метод измерения расстояния до морского дна, который будет применен в оптических локационных системах, должен быть определен только с учетом определения конкретной частоты излучения, которую в свою очередь можно выбрать только с учетом особенностей прохождения электромагнитной энергии светового диапазона различных длин волн через водную среду. Без этого создать оптическую систему определения местоположения АНПА невозможно.

Это потребует проведения значительных теоретических и практических работ в области лазерной локации и прохождения лазерного излучения через водную среду. На основании этих исследований можно будет организовать работы по созданию специальных цифровых карт морского дна.

#### 3. Специальные цифровые карты морского дна

В настоящее время специальных цифровых карт морского дна не существует. Задач по формированию сплошных карт морского дна для обеспечения определения местоположения АНПА оптическими системами никто не решал. Решение такой технической задачи требует значительных затрат.

В настоящее время ориентация АНПА осуществляется с помощью приемника GPS (аппарат с определенной периодичностью должен всплывать для определения места) или же должен управляться по специализированному гидроакустическому каналу телеуправления с пункта управления [5]. Все эти способы, применяемые для обеспечения определения места, ограничивают маневрирование АНПА по курсу, скорости и глубине.

Однако технический прогресс не стоит на месте. В настоящее время в зарубежных ВМС предпринимаются активные попытки создать специализированную глобальную систему для обеспечения ориентации АНПА при его движении по маршруту в автономном режиме [6].

В частности, по сообщениям иностранной прессы, компания Draper создает акустическую систему навигации, получившую название POSYDON — Positioning System for Deep Ocean Navigation (система позиционирования для глубокого судоходства океана). Система POSYDON будет использовать принципы, аналогичные тем, которые применяются в системе GPS. Для нее будет создано небольшое количество акустических источников дальнего радиуса действия, так, чтобы любая подводная лодка или АНПА США смогли использовать метод триангуляции для определения своей позиции, не выходя на поверхность. Система должна быть готова к первым испытаниям в 2018 году. Однако вызывает большое сомнение надежность работы данной системы в случае неблагоприятных условий распространения звука в море.

Кроме того, для надежной работы системы POSYDON потребуется установить большое количество гидроакустических ответчиков, специализированной аппаратуры управления и систем жизнеобеспечения, в частности, мощных автономных источников питания. Такой путь является достаточно затратным.

Более дешевым способом обеспечить маневрирование АНПА является внедрение цифровых карт морского дна. Это обеспечит надежную ориентацию АНПА. При выборе маршрута передвижения АНПА для обеспечения навигационной безопасности достаточно заранее сформировать несколько цифровых карт морского дна (ЦКМД) тех районов, через которые предполагается прохождение АНПА. При невозможности сформировать ЦКМД в полном объеме во время решения задач, поставленных программным заданием, по пути маршрута передвижения АНПА необходимо иметь возможность периодически уточнять своё место в этих «квадратах коррекции». При этом количество и размеры последних будут определяться точносчисления координат  $AH\Pi A$ c помощью бортовой автономной навигационной системы.

Данный способ потребует проведения предварительных работ. В частности, «оцифровки» некоторых районов Мирового океана. Однако стоимость этих работ будет намного ниже, чем создание специализированной гидроакустической системы подводного позиционирования.

#### Выводы

Применение оптической лазерной системы определения места является наиболее перспективным из всех имеющихся и разрабатываемых способов обеспечения ориентации АНПА при движении его по маршруту. самое главное преимущество данной системы — высокая точность определения места АНПА. Конкретный вариант оптической локационной системы должен быть определен при проведении натурных испытаний прототипа аппаратуры определения места с помощью лазера (способ определения места, длина волны, используемой в установке, мощность излучения). Все эти практические результаты, полученные в ходе натурных испытаний, облегчат проектирование системы.

Однако, несмотря на большие плюсы данного способа определения места, он имеет и существенные минусы, к которым можно отнести небольшую проникающую способность (до нескольких сотен метров), а также необходимость иметь специализированные цифровые карты морского дна.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Инзарцев А. В., Каморный А. В., Львов О. Ю., Матвиенко Ю. В., Рылов Н. И. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные аппараты, робототехнические комплексы, их системы и технологии. 2007. № 2. С. 5–8.
- 2. Восемнадцатая дивизия подводных лодок Северного Флота / Люди, корабли, события. Специальный выпуск альманаха «Тайфун». Серия «На службе Отечеству». Вып. 13. СПб.: 2011. С. 96—98.
- 3. Неконтактные методы измерения океанографических параметров: Сборник докладов 4-го всесоюзного семинара, Одесса, 21–24 декабря 1981 г. / Под. ред. И. В. Киреева. С. 111–113.
- 4. Молебный В. В. Оптико-локационные системы. М.: Машиностроение, 1981. С. 56–57.
- 5. Ваулин Ю. В., Инзарцев А. В., Каморный А. В., Кисилев Л. В., Матвиенко Ю. В., Рылов Н. И., Рылов Р. Н. Навигационный комплекс автономного робота и особенности его применения в условиях // Подводные аппараты, робототехнические комплексы, их системы и технологии. 2007. № 2. С. 12–15.

6. Мазур Степан. DARPA строит акустическую GPS для подводных лодок и беспилотных летательных аппаратов Сайт JSON.TV. URL: http://json.tv/tech\_trend/military-equipment/darpa-stroit-akusticheskiy-gps-dlya-podvodnyh-lodok-i-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-20160511041541

## PROSPECTS FOR EMPLOYMENT OF OPTICAL LOCATION AIDS TO FIX THE POSITION OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

#### S. P. Shirshnev (CDB ME «Rubin»)

The physics of the optical radiation through the sea water is described. The ways of development of the optical location systems and creation of special-purpose sea bottom charts using them as a basis, are analyzed.

## ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

УДК 551.48

#### МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО ПО ГИДРОГРАФИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ В АРКТИКЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

К. Г. СТАВРОВ (АО «ГНИНГИ»)

Рассмотрены принципы организации и реализации международного сотрудничества в области изучения и освоения Мирового океана на примере гидрографических исследований Северного Ледовитого океана АО «ГНИНГИ».

Полярные регионы являются неотъемлемой и быстро изменяющейся частью системы планеты Земля. Будущее окружающей человека среды, его благополучие и устойчивое развитие требуют всестороннего понимания полярных систем, процессов и изменений, происходящих в полярных регионах, а также наблюдения за ними. Итоги международных исследований Северного Ледовитого океана свидетельствуют: то, что происходит в полярных регионах, сказывается во всем мире и затрагивает всех нас. Процессы, происходящие в Северном Ледовитом океане (СЛО), не знают межгосударственных границ и имеют глобальные последствия. В последние годы шельф становится основным районом добычи полезных ископаемых.

Деятельность в области освоения Мирового океана и, в частности, арктических акваторий регулируется международным морским правом [1].

**Международное морское право** — это отрасль международного права, совокупность правовых норм, регулирующих отношения в области торгового и военного мореплавания, рыболовства и морского промысла, добычи биологических и минеральных ресурсов, научных исследований.

История современного международного морского права отсчитывается с момента создания ООН и ее Комиссии международного права. С этого момента проведены три конференции по морскому праву.

I Конференция ООН по морскому праву (1958 г.) завершилась принятием четырех конвенций:

Об открытом море;

- О территориальном море и прилегающей зоне;
- О континентальном шельфе;
- О рыболовстве и охране живых ресурсов открытого моря.
- **II Конференция ООН по морскому праву (1960 г.)** оказалась безрезультатной. Тем не менее отдельные аспекты международного сотрудничества впоследствии были урегулированы в большой группе специальных соглашений (Конвенций):

Об охране человеческой жизни на море (1960 и 1974 гг.);

- О Международных правилах предотвращения столкновения судов на море (1972 г.);
  - О Международной организации морской спутниковой связи (1976 г.);

О поиске и спасении на море (1979 г.) и др.

**Ш Конференция ООН по морскому праву**, работавшая с 1973 по 1982 г., была самой трудоемкой и успешной. В ней участвовало беспрецедентно большое число государств — 164, что затрудняло поиск компромиссов и взаимоприемлемых решений. Конференция рассмотрела практически все основные вопросы международного морского права.

Была принята **Конвенция ООН по морскому праву**, состоящая из 17 частей, включающих 320 статей и девяти приложений [2, 3].

Конвенция подтвердила и существенно дополнила общепризнанные нормы морского права, а том числе положение о территориальном море, прилегающей зоне, открытом море и континентальном шельфе.

В частности, Конвенция установила право государства определять ширину территориального моря в пределах 12 морских миль, а прилагающей зоны — 24 морских миль, подтвердила суверенитет прибрежного государства над территориальным морем.

Конвенция содержит ряд новых положений, которые существенно изменяют и развивают международно-правовой режим Мирового океана. Ее положениями были установлены статус международного района морского дна за пределами континентального шельфа и режим разработки его ресурсов.

Конвенция ввела и дала определения новых видов морских пространств: исключительной экономической зоны и архипелажных вод.

В конвенции были также разработаны положения относительно транзитного прохода судов через международные проливы, перекрытые территориальными водами; группы норм, регулирующих сотрудничество государств в области защиты морской среды; проведение научных морских исследований в различных по своему правовому режиму частях Мирового океана. Установлены следующие основные термины в области классификации морских пространств.

Внутренние воды — часть территории государства. Они включают: водоемы, полностью окруженные берегами одного государства, акватории портов, морские бухты, заливы, лиманы, берега которых принадлежат одному государству, с шириной входа, не превышающей 24 миль. К внутренним водам также относятся так называемые исторические воды, к которым принадлежат и воды некоторых заливов независимо от ширины входа. Их перечень устанавливается государством. К примеру, наши северные моря относятся международным правом к внутренним водам Российской Федерации.

**Прибрежное государство** в силу своего суверенитета определяет порядок доступа во внутренние воды иностранных судов, которые подчиняются его юрисдикции. Прибрежное государство может устанавливать для иностранных судов один из режимов: национальный, наибольшего благоприятствования или специальный. Оно также регулирует судоходство и рыболовство. Без его разрешения запрещено заниматься каким-либо промыслом или научными исследованиями.

**Территориальное море** — морской пояс, расположенный вдоль берега или за внутренними морскими водами прибрежного государства. Ширина территориального моря у подавляющего большинства государств составляет 12 морских миль.

Территориальное море, воздушное пространство над ним, а также поверхность дна и недра находятся под суверенитетом прибрежного государства и являются частью его территории.

**Внешняя граница территориального моря** считается морской государственной границей государства. Любая деятельность физических и юридических лиц здесь может осуществляться только с разрешения этого государства. Изъятием из этих прав является право мирного прохода невоенных судов всех государств.

**Под проходом** понимается плавание с целью пересечь это море, не заходя во внутренние воды или не останавливаясь на рейде или у портового сооружения за пределами внутренних вод.

**Открытое море** (по Конвенции 1958 г.) представляет собой морское пространство, расположенное за пределами территориального моря, открытое для общего и равноправного пользования всех наций без права распространения на него суверенитета какого-либо государства.

**Прилежащая зона** — это зона открытого моря, примыкающая к территориальному морю прибрежного государства с целью предотвращения возможного нарушения установленных им правил и законов.

**Право прибрежного государства на прилежащую зону** сводится к праву предотвращения нарушения таможенных, фискальных, иммиграционных или санитарных законов, или правил в пределах его территории или территориального моря и праву наказания за нарушение указанных законов и правил.

**Исключительная экономическая зона** — район за пределами территориального моря и прилегающий к нему район шириной до 200 морских миль от исходных линий, от которых измеряется ширина территориального моря.

Прибрежное государство имеет суверенные права на разведку, разработку и сохранение живых и неживых природных ресурсов в водах, на морском дне и в его недрах, а также на управление ими; право сооружать, а также разрешать и регулировать создание и эксплуатацию искусственных островов и установок, устанавливать вокруг них зоны безопасности, регулировать улов живых ресурсов, взимать сборы, разрешать научные исследования.

Все другие государства пользуются в исключительной экономической зоне свободой судоходства, полетов, прокладки кабелей и трубопроводов при условии соблюдения ими соответствующих положений Конвенции 1982 г.

**Континентальный шельф** (по Конвенции ООН по морскому праву 1982 г.) – морское дно, включая его недра, простирающиеся от внешней границы территориального моря прибрежного государства до пределов, установленных конвенцией. В связи со сложностью определения границы континентального шельфа в соответствии с Конвенцией 1982 г. создается международная комиссия, которая должна рассматривать предложения государств по установлению границ континентального шельфа, если заинтересованные стороны не смогут прийти к соглашению по этому вопросу.

**Прибрежное** государство осуществляет суверенные права на разведку и разработку естественных ресурсов шельфа. Другие государства могут заниматься этой деятельностью только с согласия прибрежного государства. Однако его права не распространяются на воды, покрывающие континентальный шельф и воздушное пространство над ним, где осуществляется свобода мореплавания и полетов воздушных судов.

**Под международным районом морского дна** понимается дно морей и океанов и его недра, находящиеся за пределами национальной юрисдикции.

По Конвенции 1982 г. дно морей и океанов и его недра (минеральные ресурсы) объявлены общим достоянием человечества. Ни одно государство не может претендовать на суверенитет или суверенные права, или осуществлять их в отношении этого района.

Права на ресурсы здесь принадлежат всему человечеству, от имени которого действует Международный орган по морскому дну. Деятельность по разведке и разработке может осуществляться создаваемыми при этом органе предприятиями, государствами-участниками, государственными предприятиями, физическими и юридическими лицами при государственном поручительстве. Орган обеспечивает справедливое распределение финансовых и экономических выгод, полученных от деятельности в этом районе.

Более 60 международных организаций действует в области освоения Мирового океана и определяют порядок и условия той или иной деятельности государств.

Крупнейшей из них является **Международная морская организация (ИМО)** (*International Maritime Organization (IMO*) основана ООН в 1958 г. в качестве Межправительственной морской консультативной организации, содействующей безопасности на море и эффективной навигации. Штаб-квартира расположена в Лондоне.

В ней участвуют практически все государства, связанные с использованием морских пространств и ресурсов. В компетенцию ИМО входят: технические вопросы деятельности морских торговых флотов, обеспечение безопасности на море, повышение эффективности мореплавания, защита морской среды от загрязнения, разработка проектов, международно-правовых соглашений, регулирующих сотрудничество государств в Мировом океане, созыв международных конференций.

К числу таких соглашений можно отнести, в частности, Конвенцию по борьбе с незаконными актами, направленными против безопасности стационарных платформ на континентальном шельфе (1988 г.), Конвенцию о спасении на море (1989 г.), Конвенцию по обеспечению готовности на случай загрязнения нефтью, борьбе с ним и сотрудничеству (1990 г.) и др.

Межправительственная океанографическая комиссия (МОК) создана в 1960 г. в рамках ЮНЕСКО (UNESCO – The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) — Организации Объединённых Наций по вопросам образования, науки и культуры.

МОК ЮНЕСКО координирует сотрудничество государств в научных исследованиях, состояние морской среды, включая ее загрязнение, разрабатывает международно-правовые нормы в этой области.

Целью МОК является содействие международному сотрудничеству и координации программ исследований Мирового океана, расширению знаний о природе и ресурсах океана и прибрежных районов, использования этих знаний для совершенствования управления, обеспечения устойчивого развития, охраны морской среды.

На первых этапах основное внимание МОК уделялось организации совместных экспедиционных исследований в отдельных районах Мирового океана и организации международного обмена океанографическими данными. В последние два десятилетия значительно возросла роль МОК в решении глобальных и региональных проблем, связанных с Мировым океаном. Многие программы МОК выполняются сов-

местно с другими международными организациями системы ООН (ВМО, ММО, ЮНЕП), а также МГБ, МСНС, СКОР, МСИМ и др.

В деятельности МОК принимают участие почти все ведущие национальные мореведческие организации и научно-исследовательские институты стран-членов МОК.

ООН признала МОК в качестве ключевой организации системы ООН в области морских наук и служб. Штаб-квартира МОК расположена в Париже.

Под эгидой МОК ЮНЕСКО создана система Международного Обмена Океанографическими Данными (МООД). Эта система включает в себя сеть Мировых (МЦД-А – США, Вашингтон; МЦД-Б – Россия, Обнинск; МЦД-Д – Китай, Пекин) и более 60 национальных центров океанографических данных.

Деятельность в системе МООД регламентируется Руководством по международному обмену данными, в соответствии с которым Мировые (МЦД), Ответственные (ОНЦОД) и Национальные центры данных (НЦОД) получают, хранят и распространяют данные по Мировому океану. В России функции НЦОД выполняет ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета.

**Международный совет по исследованию моря (МСИМ)** был учреждён в 1902 году с целью проведения научных исследований на уровне международного сотрудничества и межгосударственных соглашений в интересах промысла и рациональной эксплуатации морских ресурсов.

В настоящее время в МСИМ входят 20 государств и ряд неправительственных организаций. К работе в МСИМ привлечены тысячи учёных из разных стран мира. В рамках Международного совета функционируют 12 комитетов, объединяющих более 100 рабочих и исследовательских групп.

Научный комитет по океаническим исследованиям (СКОР) (Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR) был создан Международным советом по науке (МСНС) в 1957 г. СКОР является неправительственной организацией, которой поручено содействовать развитию международного сотрудничества в области наук об океане. СКОР создает рабочие группы для отражения положения дел в конкретных областях наук об океане, участвует в планировании и поддержке долгосрочных крупномасштабных международных научно-исследовательских проектов в области наук об океане и выступает в качестве официального научного консультанта МОК ЮНЕСКО.

**Международная Гидрографическая Организация (МГО)** (*International Hydrographic Organizaton* (*IHO*) создана в Монако в 1967 г. На правах отделения МГО фукционирует **Международное Гидрографическое Бюро (МГБ)**, учрежденное князем Монако Альбертом I в 1921 г.

Целью МГО и МГБ является координация деятельности национальных гидрографических служб, унификация морских навигационных карт и документов, принятие эффективных методов проведения гидрографических съемок и использования их результатов, содействие обмену морскими навигационными картами между гидрографическими службами государств, распространение океанографических знаний и их применение на благо мореплавателям.

Международная ассоциация физических наук об океане (МАФНО) (International Association for the Physical Sciences of the Ocean (IAPSO) — неправительственная научная организация, созданная в 1919 г. с целью оказания содействия изучению научных проблем, связанных с океаном, и процессов, протекающих на его границах, с помощью достижений математики, физики, химии.

**Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП)** (*United Nations Environment Programme* (*UNEP*) — создана в 1972 г. с целью способствования устойчивому развитию через экологическую деятельность. Программа охватывает широкий круг вопросов — от атмосферы и наземных экосистем, развития экологической науки и информации до раннего предупреждения и способности быстрого реагирования на экологические проблемы и катастрофы.

В число международных организаций, деятельность которых непосредственно связана с изучением Арктики, входят следующие.

**Арктический Совет** (*Arctic Council*) — создан в 1996 г. Межправительственная организация для рассмотрения проблем, представляющих общую озабоченность стран Арктики: Канады, Дании (включая Гренландию и Фарерские острова), Финляндии, Исландии, Норвегии, России, Швеции и США. Россию в Совете представляет МИД России.

**Международный научный арктический комитет (МНАК)** (International Arctic Science Committee (IASC) — создан в 1990 г. В состав Совета МНАК входят представители Канады, КНР, Дании, Финляндии, Франции, Германии, Исландии, Италии, Японии, Нидерландов, Норвегии, Польши, России, республики Корея, Швеции, Швейцарии, Великобритании.

**Научный совет по исследованию Северного Ледовитого океана (НССЛО)** (Arctic Ocean Science Board (AOSB) — создан в 1984 г. В состав НССЛО входят: Канада, КНР, Дания, Финляндия, Франция, Германия, Исландия, Япония, Республика Корея, Нидерланды, Норвегия, Польша, Россия, Швеция, Швейцария, Великобритания, США.

Всемирная метеорологическая организация (ВМО) и МОК ЮНЕСКО сотрудничают в Арктике в рамках Совместной ВМО-МОК Технической комиссии по океанографии и морской метеорологии (СКОММ) (Joint WMO-IOC Technical Commission on Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM), деятельность которой включает в числе прочих аспекты, связанные с наблюдениями в Арктике, управлением данными и обслуживанием в области морской метеорологии и океанографии, в том числе морской лед и др.

**Международные программы**, связанные с изучением Северного Ледовитого океана:

Всемирная программа исследований климата (ВПИК) (ВМО, МСНС, МОК) (World Climate Research Programme (WCRP) (www.wmo.ch/web/wcrp/).

Проект ВПИК по изучению арктической климатической системы (АКСИС) – *Arctic Climate System Study (ACSYS)* 1994–2003 гг. (http://acsys.npolar.no).

Проект ВПИК «Климат и криосфера» (КЛиК) (Climate and Cryosphere (CliC) осуществляется с 2000 г. (http://clic.npolar.no).

Международная батиметрическая карта Северного Ледовитого океана (МБКСЛО) (МГО-МОК) с 1997 г. (*International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO*) (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/) и др.

**В Российской Федерации в** 1992 г. был создан Национальный океанографический комитет Российской Федерации (НОК РФ).

Постановлением Правительства Российской Федерации от 5 февраля 2008 г. № 49 «О взаимодействии с Межправительственной океанографической комиссией ЮНЕСКО» Национальный океанографический комитет Российской Федерации пе-

# реименован в Межведомственную национальную океанографическую комиссию Российской Федерации (МНОК России).

Этим постановлением на МНОК России, образованную при Министерстве образования и науки, возложена организация участия заинтересованных федеральных органов исполнительной власти и мореведческих учреждений в деятельности Межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО по вопросам международного научно-технического сотрудничества в области изучения Мирового океана и его ресурсов, представление Российской Федерации в МОК ЮНЕСКО, координация (совместно с Минобрнауки) морских научных исследований на акваториях, находящихся под юрисдикцией Российской Федерации [4].

Важную роль в изучении Мирового океана играет Управление навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации (УНиО МО РФ).

Россия в соответствии с Конвенцией ООН по морскому праву и Международной конвенцией по охране человеческой жизни на море приняла обязательства по поддержанию на современном уровне навигационной безопасности мореплавания в своих водах. Ответственность за это возложена на УНиО МО РФ, которое несет также ответственность за поддержание на должном уровне систем навигационногидрографического и гидрометеорологического обеспечения (НГГМО) ВМФ и издание морских карт и руководств для плавания.

УНиО МО является официальным представителем Российской Федерации в Международной гидрографической организации и Международной ассоциации маячных служб, а также осуществляет международное сотрудничество в области мореплавания и изучения Мирового океана с Международной морской организацией, Межправительственной океанографической комиссией ЮНЕСКО и другими международными организациями. УНиО МО РФ является органом управления Гидрографической службы Военно-Морского Флота (ГС ВМФ).

С момента своего создания в 1939 г. Государственный научноисследовательский навигационно-гидрографический институт (ГНИНГИ) является головной научной организацией ГС ВМФ. В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 19 июня 1994 года № 711 ГНИНГИ определен головной научноисследовательской организацией, ответственной за разработку и обоснование технической политики в области навигации, гидрографии, морской картографии, океанографического обеспечения обороны и экономики страны. В 2009 г. в соответствии с Указом Президента Российской Федерации ГНИНГИ был акционирован с сохранением функций головной научной организации страны в области НГГМО морской деятельности как в интересах обороны, так и экономики России.

АО «ГНИНГИ» принимает активное участие в работе МОК ЮНЕСКО (через МНОК России), МООД, МГО, ВМО и других международных научных организаций. Специалисты Института также делегируются для работы в многосторонних региональных советах и комиссиях по изучению и освоению пространств и ресурсов морей и океанов

В качестве одного из примеров участия АО «ГНИНГИ» в морской экономической деятельности является осуществление работ по НГГМО проектирования и морских операций по буксировке и постановке морской ледостойкой стационарной платформы «Приразломная» в Печорском море, проектирования и прокладки подводного газопровода «Северный поток», другие исследования, выполненные по заказу крупнейших отечественных и зарубежных морепользователей [5].

С конца 1990-х годов ГНИНГИ активно как головная гидрографическая организация участвует в работах по обоснованию положения внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) РФ в соответствии с требованиями Конвенции ООН по морскому праву 1982 года (далее Конвенция) [3, 6].

Эта Конвенция уточнила юридическое определение континентального шельфа прибрежного государства, внесла значительные изменения в определение правового режима и положения его внешней границы. Юридический континентальный шельф включает в себя всю подводную окраину материка, т. е. географический шельф, склон и подъем за пределами двухсотмильной исключительной экономической зоны. В него не входят дно океанов на больших глубинах, в том числе его океанические хребты или его недра.

Из-за сложности определения границы континентального шельфа в соответствии с Конвенцией при ООН создана международная комиссия, которая рассматривает заявки государств на установление расширенных границ континентального шельфа. Были установлены граничные сроки подачи заявок прибрежных государств в Комиссию ООН по границам континентального шельфа.

В связи с этим большинство прибрежных государств резко активизировало свои гидрографические и морские геофизические работы с таким расчетом, чтобы на их основе в соответствии с нормами Конвенции подать заявку и закрепить через Комиссию ООН свою юрисдикцию под континентальным шельфом.

Правительством РФ в июне 1997 г. было принято Постановление «О порядке утверждения перечней географических координат точек, определяющих линии внешних границ континентального шельфа Российской Федерации», а в феврале 2000 г. была одобрена «Концепция проекта внешней границы континентального шельфа РФ».

В соответствии с этой Концепцией с использованием всех имеющихся на тот период данных по рельефу дна и мощности осадочного комплекса с участием ГНИНГИ была разработана и в 2001 г. представлена в Комиссию ООН по границам континентального шельфа российская заявка на установление внешней границы континентального шельфа в Северном Ледовитом океане, а также в Охотском и Беринговом морях.

После рассмотрения заявки Комиссия ООН вынесла рекомендации по представлению дополнительных навигационно-гидрографических и геофизических данных, отвечающих по своему качеству и точности, а также методике и технологиям их получения требованиям Научно-технического руководства Комиссии [7].

Для получения этих данных и подготовки обновленной заявки Решением Правительства Российской Федерации от 7 апреля 2009 г. Федеральному агентству по недропользованию (Роснедра) было поручено организовать необходимые Арктические экспедиции.

В 2009–2014 гг. АО «ГНИНГИ» по заказам Роснедра выполнил разработку научно-технического проекта и в кооперации с учреждениями Роснедра, Росгидромета и другими организациями провел ряд экспедиционных работ по изучению рельефа морского дна и осадочного слоя с надводных судов, в том числе в районах, покрытых дрейфующим многолетним льдом [8, 9].

При этом результаты работ ГНИНГИ на Дальнем Востоке внесли определяющий вклад в решение Комиссии ООН по границам континентального шельфа об отнесении центральной части Охотского моря к континентальному шельфу России,

принятое в 2014 г. Результаты арктических экспедиций ГНИНГИ положены в основу пересмотренной Заявки России на расширенный континентальный шельф в СЛО, представленной в Комиссию ООН в 2015 г.

При выполнении арктических экспедиций широко использовался международный опыт подготовки и проведения исследований. Для батиметрических исследований применялся норвежский многолучевой эхолот, установленный на НЭС «Академик Федоров» в процессе его дооборудования финскими судостроителями. А при проведении в экспедиции «Шельф – 2011» морских сейсмических работ на НЭС «Академик Федоров» основным субподрядчиком была выбрана американская геофизическая корпорация ION-GXT.

Уникальный опыт международного сотрудничества в экспедициях ГНИНГИ «Шельф – 2010» и «Шельф – 2011» лёг в основу дальнейших экспедиций «Арктика – 2012» и «Арктика – 2014», в ходе которых специалисты Института успешно осуществили как навигационно-гидрографическое обеспечение всего комплекса работ, так и непосредственно исследования рельефа дна.

Все данные, полученные в этих экспедициях, включены в государственные информационные ресурсы и использованы при подготовке доработанного Представления Российской Федерации по границам континентального шельфа в Северном Ледовитом океане, представленного в 2015 г. в Комиссию ООН по границам континентального шельфа.

В настоящее время специалисты АО «ГНИНГИ» в составе российской делегации активно участвуют в работе Комиссии ООН по рассмотрению данного Представления  $P\Phi$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

- Российская Арктика территория права: альманах. Выпуск II. Сохранение и устойчивое развитие Арктики: правовые аспекты / С. Е. Нарышкин, Т. Я. Хабриева, Д. Н. Кобылкин и др.; отв. ред. В. П. Емельянцев, Е. А. Галиновская. – М.: Правительство Ямало-Ненецкого автономного округа; Институт законодательства и сравнительного правоведения при Правительстве Российской Федерации, М., Салехард; ИД «Юриспруденция», 2015. – 392 с.
- 2. Международная Конвенция ООН по морскому праву 1982 г. Министерство Обороны СССР. М.; Военное излательство, 1985. 224 с.
- 3. Федеральный закон от 26 февраля 1997 г. № 30-Ф3 «О ратификации конвенции Организации Объединенных Наций по морскому праву и соглашения об осуществлении части XI конвенции Организации Объединенных Наций по морскому праву» // Российская газета, 1997. № 43-44 от 04.03.97 г.
- Правила проведения морских научных исследований во внутренних морских водах, в территориальном море, в исключительной экономической зоне и на континентальном шельфе Российской Федерации. – Собрание законодательства Российской Федерации, 09.08.2004., № 32, ст. 3338.
- 5. Зеньков А. Ф., Ставров К. Г., Титлянов В. А. Опыт работы ГНИНГИ Минобороны России в интересах обеспечения безопасности морской деятельности Российской Федерации в Северном Ледовитом океане Российской Арктика территория права: альманах. Выпуск ІІ. Сохранение и устойчивое развитие Российской Федерации. М., Салехард; ИД «Юриспруденция», 2015. С. 167—172.
- 6. Алексеев С. П., Опарин А. Б., Ставров К. Г. Значение работ Гидрографической службы Военно-Морского Флота для определения внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Арктике // Морской сборник. − 2003. − № 9. − С. 31–34.
- 7. Научно-техническое руководство Комиссии по границам континентального шельфа. Пятая сессия. Нью-Йорк, 3–14 мая 1999 г. 90 с.
- 8. Алексеев С. П., Глумов И. Ф., Ледовских А. А., Ставров К. Г. и др. Гидрографические исследования в Центральном Арктическом бассейне на надводном судне в интересах обоснования внешней границы континентального шельфа России // Труды Научной конференции XIV Съезда Россий-

- ского географического общества, 11–14 декабря 2010, г. Санкт-Петербург. СПб: Изд. РГО, 2010. С. 101–110.
- 9. Зеньков А. Ф., Ставров К. Г. На Арктических рубежах // Государственный надзор. 2016. № 1(21). С. 90–91.

# INTERNATIONAL CO-OPERATION FOR HYDROGRAPHIC EXPLORATIONS IN THE ARCTIC: THEORY AND PRACTICE

#### K. G. Stavrov («GNINGI» JSC)

The principles of organization and implementation of international co-operation in the sphere of study and mastery of the operations in the World ocean, using the hydrographic explorations of the Arctic Ocean by «GNINGI» JSC as an example, are considered.

УДК 528.9

# КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАНОСИМОСТИ АКВАТОРИИ

**А. М. АБРАМОВ** (АО «ГНИНГИ»)

В статье предлагается метод количественного определения заносимости акватории. В качестве критерия заносимости принимается отношение вычисленных расстояний между картографическими отображениями береговой линии и одной и той же изобаты из съемок рельефа дна, выполненных в разное время. Для вычисления расстояния между ними используется метрика Хаусдорфа.

К числу важных задач, возложенных на гидрографические службы флотов, относится контроль изменчивости рельефа морского дна на акваториях, значимых в навигационно-гидрографическом отношении. Для решения этой задачи установлен [1] особый вид гидрографических работ — определение заносимости акваторий. Эти работы, имеющие целью определение влияющих на навигационную безопасность кораблевождения изменений рельефа морского дна, необходимо периодически и/или после дноуглубления выполнять на фарватерах (каналах), входах в гавани и порты. На участках с высокой изменчивостью подводного рельефа они должны выполняться также после сильных штормов, весеннего половодья, паводков. По результатам этих работ корректируются навигационные морские карты, определяются сроки проведения повторных съемок рельефа дна, принимаются решения по рациональному распределению сил и средств гидрографических служб флотов, привлекаемых для их выполнения.

В настоящее время заносимость акваторий определяется визуальным сравнением показанных на планах акваторий разновременных изображений рельефа одного и того же участка морского дна. Для картографического отображения подводного рельефа используются точечные отметки глубин и изолинии, представляющие в нашем случае береговую линию и изобаты. Для определения заносимости рекомендуется сравнивать положение изобат относительно береговой линии. Если на совмещенном плане наблюдается смещение изобаты «мористее» своего прежнего положения, то делается вывод о существовании заносимости акватории [1]. Количественная оценка

величины заносимости в Правилах Гидрографической службы [1] не предусмотрена. Очевидно, что делать объективные выводы о заносимости акватории из визуального сравнения картографических изображений подводного рельефа затруднительно, поэтому целесообразно разработать метод количественной оценки их близости, исключающий субъективный подход. В качестве меры близости сравниваемых изолиний будем искать однозначно определяемое расстояние между ними.

Известно, что расстояние между точками может определяться величиной их соединяющего отрезка. Например, для точечных отметок глубин (a, b), нанесенных на план, показанный на рисунке, величина отрезка, выражающая расстояние между ними  $\rho(a,b)$ , рассчитывается по формуле (1):

$$\rho(a,b) = \left( \left| x_2 - x_1 \right|^2 + \left| y_2 - y_1 \right|^2 \right)^{1/2}$$
 (1)

где  $x_1, y_1$  – координаты точки (*a*);

 $x_2, y_2$  – координаты точки (*b*).

Как видно, определенное по формуле (1) расстояние  $\rho(a,b)$  между двумя любыми отметками глубин (a,b), всегда:

$$\rho(a,b) > 0$$
, при любом положении отметок глубин на карте; (2)

$$\rho(a,b) = 0$$
, если отметки глубин совпадают; (3)

$$\rho(a,b) = \rho(b,a)$$
, не зависит от выбора исходной для определения расстояния отметки глубины. (4)

Кроме того, для любых трех точек на плоскости (a, b, q), не находящихся на одной прямой, справедливо неравенство треугольника:

$$\rho(a,q) + \rho(q,b) > \rho(a,b). \tag{5}$$

Поэтому расстояние между отметки глубин (a, b), выраженное длиной их соединяющего отрезка прямой, будет единственным минимальным из всех возможных соединений. Также отметим, что расстояние, для которого выполняются условия (2-5), называется метрикой. Использование расстояний, обладающих свойствами метрики, позволяет однозначно оценивать близость сравниваемых объектов.

В нашем случае искомое для оценки заносимости расстояние между изолиниями вычислить так же, как это было показано выше для точек, невозможно. В самом деле, если мы попробуем определить расстояние (R), как отрезок минимальной длины между точками, принадлежащими этим изолиниям, изображающим на рисунке береговую линию (S) и два положения одной и той же изобаты, называемыми далее первой (C) и второй (D) изобатами, то убедимся, что:

— невозможно установить направление и величину смещения, какой-либо точки (c), принадлежащей изобате (C), в ее новое положение (d) на изобате (D);

- расстояния от разных отдельных точек на изобатах могут быть разными, например  $R_{1DC} > R_{2DC}$ ;
- в точках пересечения изобат (C, D), расстояния между ними равны нулю,  $R_0$ =0, но изобаты в других точках не совпадают;
- расстояние, измеренное от какой-либо точки на изобате (C), не равно расстоянию, измеренному от изобаты (D) до этой же точки, например  $R_{3DC} > R_{3CD}$ ;
- неравенство треугольника может не выполняться для некоторых точек, принадлежащих изобатам (C, D), например:

$$R_{1SC} + R_{3CD} < R_{\text{max DS}}$$
 (6)

Таким образом, метрика, используемая для определения расстояний между отметками глубин на карте, не является мерой близости для картографических отображений береговой линии и изобат. В работе [2] показано, что мерой близости между множествами точек, представляющих на картах изолинии, является хаусдорфова метрика, и приведены необходимые и достаточные условия корректности ее вычисления.

В нашем случае сравниваемые множества точек отображают на карте береговую линию и изобаты, а требование к их компактности для корректности вычисления метрики достигается замкнутостью изолиний или их ограничением в пределах оцениваемого участка акватории. Если мы, используя хаусдорфову метрику, однозначно оценим их близость, то оценку заносимости акватории можно представить отношением вычисленных метрик.

Действительно, если представленное хаусдорфовой метрикой расстояние между изображенными на карте береговой линией и изобатой увеличилось, то это значит, что изобата сместилась «мористее».

Применительно к обозначенным на рисунке изобатам (C, D), хаусдорфова метрика определяется, по формуле (7) как максимальное из двух расстояний, вычисленных от первой изолинии до второй, и наоборот:

$$R_H(C, D) = \max[r_H(C, D), r_H(D, C)],$$
 (7)

где  $R_H(C,D)$  – метрика Хаусдорфа;

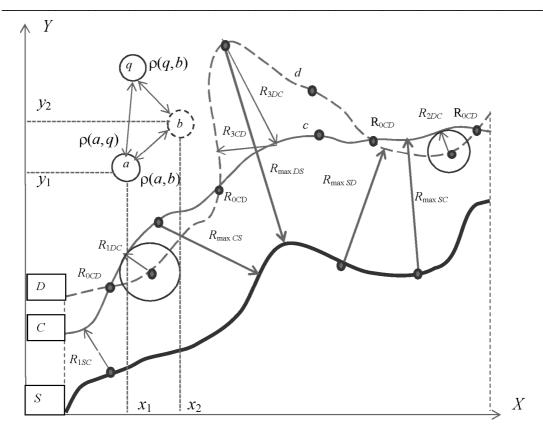
 $r_H(C,D)$ ,  $r_H(D,C)$  – расстояния от множества точек, принадлежащих C, до множества точек, принадлежащих D, и наоборот.

$$r_{H}(C,D) = \max[r_{h}(c,D) : c \in C], \tag{8}$$

где  $r_h(c,D)$  – расстояние от некоторой точки (c), принадлежащей C, до множества точек D.

$$r_h(c, D) = \min \left[ |c - d| : d \in D \right]$$
(9)

где c, d – точки, принадлежащие изолиниям C, D.



Измерение расстояний между точечными и линейными объектами, отображающими подводный рельеф

Условные обозначения:

S | − береговая линия;

С – первая изобата;

D − вторая изобата;

точки на изобатах С и D;

 $-R_{iCD}(R_{iDC})$  – расстояния от изобаты C(D) до изобаты D(C);

 $\binom{a}{a}$  – точечные отметки глубин;

abla 
ho(a,q) – расстояние между отметками глубин;

X, Y — прямоугольная система координат.

Используя хаусдорфову метрику для оценки заносимости акватории, можно предложить следующую последовательность вычислений.

- 1. Вычисляем по формуле (1) расстояния  $\rho_i(s,C)$  от каждой фиксированной (i) точки, принадлежащей береговой линии (S) до всех точек, принадлежащих изобате (C).
- 2. Вычисляем по формуле (9) минимальные из п.1 расстояния от каждой фиксированной (*i*) точки, принадлежащей береговой линии (*S*), до изобаты (*C*),  $r_{ih}(s,C)$  =min  $\rho_i(s,C)$ .
- 3. Вычисляем по формуле (8) максимальное из п. 2 расстояние от (*S*) до (*C*):  $r_H(S,C) = \max [r_{ib}(s,C)] = R_{\max SC}$ .
- 4. Повторяем расчеты по формулам (1, 9, 8), и вычисляем расстояние от (C) до (S):  $r_H(C,S) = \max [r_{ib}(c,S)] = R_{\max CS}$ .
- 5. Вычисляем по формуле (7) метрику Хаусдорфа между (S,C):  $R_H(S,C) = R_{\max SC} > R_{\max CS}.$
- 6. Повторяем расчеты по формулам (1, 9, 8), вычисляем метрику Хаусдорфа между (S, D):  $R_H(S, D) = R_{\max DS} > R_{\max SD}$ .
  - 7. Рассчитываем ( $\delta R_H$ ) отношение метрик Хаусдорфа:

$$\delta R_H = R_H(S,D) / R_H(S,C).$$

Если:

- $-\delta R_H > 1$ , то расстояние между береговой линией и изобатой из более поздних съемок рельефа дна увеличилось, т. е. изобата, как указано в Правилх Гидрографической службы [1], сдвинулась «мористее», что подтверждает заносимость акватории;
  - δ $R_H$  ≤ 1, заносимость акватории отсутствует.

Таким образом, вычисленное отношение метрик Хаусдорфа ( $\delta R_H$ ) однозначно количественно определяет сдвиг показанных на картах изолиний и характеризует заносимость оцениваемого участка акватории.

Предложенный метод может быть реализован программными средствами морских геоинформационных систем, что позволяет перейти от визуального к автоматизированному цифровому методу определения заносимости акваторий и его использованию в практике выполнения гидрографических работ.

Этот метод может также применяться для определения размыва морского дна в прибрежной зоне, который влияет на безопасность строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, и для оценки сходства изображений одних и тех же участков рельефа дна, показанных на разных картах.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Правила Гидрографической службы № 4. Съемка рельефа дна. Часть 2. Требования и методы (ПГС № 4, ч. 2). Л.: ГУНиО МО, 1984. 264с.
- 2. Жуков Ю. Н. Способ оценки близости положения изолиний // Навигация и гидрография, 2002, № 15. С. 101–106.

# QUANTITATIVE METHOD OF DETERMINING THE SEDIMENT ACCUMULATION IN THE WATER AREA

#### A. M. Abramov («GNINGI» JSC)

The method of quantitative determining the sediment accumulation in the water area is proposed. As the criterion of the sediment accumulation the relationship of calculated distances between the cartographic coastline delineation and the same isobaths from the bottom relief surveys carried out in various time periods, is used to calculate the distance between them, the Hausdorf metrics is used.

УДК 534.22:551.46

## МЕТОД КЛАСТЕРИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ОКЕАНЕ

Ю. Н. ЖУКОВ (АО «ГНИНГИ»)

Кластеризация — это автоматизированная процедура упорядочивания многомерных объектов в сравнительно однородные группы. Дается описание метода кластеризации вертикального распределения скорости звука в океане. Метод позволяет осуществлять автоматизированную кластеризацию массивов вертикального распределения скорости звука и получать репрезентативные кривые вертикального распределения звука для выделенных классов.

Одной из важнейших задач гидрометеорологического обеспечения (ГМО) ВМФ является задача гидроакустического обеспечения. Один из основных ее аспектов состоит в пространственно-временном районировании океана по акустическим условиям распространения звуковой энергии в морской среде. Процедура районирования базируется на делении на классы множества измеренных вертикальных распределений скорости звука (ВРСЗ) в океане и определении репрезентативной кривой ВРСЗ для каждого выделенного класса.

Классическим методом классификации BPC3 служит метод типизации кривых на небольшое число типов по типу рефракции звуковых лучей на них [1, 2]. Этот метод с успехом применялся для массивов океанографических промеров на стандартных океанографических горизонтах глубин в первой половине XX века, в докомпьютерную эпоху, когда использовался экспертный, ручной метод классификации кривых BPC3.

Со второй половины XX века технический прогресс в измерительной технике привел к появлению измерений BPC3 с малой дискретностью по глубине. Сейчас к данным такого типа относится большой массив измерений вертикального распределения температуры, солености и давления, которые проводятся с помощью дрейфующих буев-измерителей ARGO. В акустике океана BPC3 стали интерпретировать в виде фракталов. В 1990-х годах XX века в отечественной акустике океана публикуются пространные обзоры о роли фрактальных свойств BPC3 на распространение

звуковой энергии в океане [3]. В XXI века акустическое поле в океане стали рассчитывать с учетом фрактальных свойств ВРСЗ, т. е. с учетом высокочастотной изменчивости кривой ВРСЗ метрового масштаба [4, 5]. Исходной информацией для таких расчетов служит репрезентативная кривая ВРСЗ для акватории и статистические характеристики ее высокочастотной пространственно-временной изменчивости.

В настоящее время массив ARGO содержит более миллиона измерений, выполненных до глубины 2000 м с дискретностью около одного метра. Эта информация позволяет описывать детальную форму BPC3. Очевидно, что для современных алгоритмов расчета акустического поля необходимо подобные массивы BPC3 представить в виде классов типичных BPC3 с соответствующими статистическими характеристиками отклонения от них. При этом процесс выявления классов BPC3 и определения репрезентативной кривой для классов должен проводиться с удержанием всех измеренных деталей формы BPC3. Для этого требуются специфические автоматизированные методы.

Целью статьи является изложение метода кластеризации относительно большого множества ВРСЗ, представленных информацией с малой дискретностью по глубине для обеспечения акустических методов расчета звукового поля в океане, а также приведение примера его применения для массива данных ARGO из 191 станции.

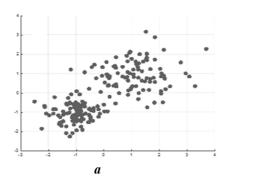
Сложность решения кластеризации множества ВРСЗ заключается в том, что вертикальный профиль скорости звука задается большим количеством (сотни и тысячи) значений по глубине. Как сравнивать такие кривые и как находить схожие кривые между собой? Здесь может помочь математика.

Формально поставленную задачу можно сформулировать следующим образом.

Пусть каждая кривая BPC3 C из множества кривых  $\{C\}$  задается N значениями скорости звука, измеренными на одинаковых значениях глубин в интервале  $h = [h_1 - h_2]$ . Тогда каждая кривая BPC3 представляет собой точку в N-мерном пространстве значений скоростей звука. При такой интерпретации можно просто вычислять расстояние между точками. Если известно расстояния между всеми парами точек, то можно определить степень близости точек друг к другу и определить те подмножества точек, которые группируются вокруг некоторых точек многомерного пространства. Последние точки называются центроидами, и они всегда не совпадают с какой-либо точкой пространства, представляющих BPC3.

Таким образом, при представлении кривых BPC3 многомерными точками, задача кластеризации BPC3 решается математическими методами. Более того, она позволяет определить центры кластеров точек BPC3 — центроиды, которые представляют собой репрезентативные BPC3 для соответствующих кластеров BPC3. Наглядная иллюстрация для двумерного случая приведена на рис. 1.

Существует большое разнообразие вычислительных алгоритмов, решающих задачу кластеризации многомерных данных [6]. Для кластеризации ВРСЗ предлагается воспользоваться методом *k*-средних (*k*-means). Этот метод был изобретен в 1950-х годах математиком Гуго Штейнгаузом [7, 8] и широко применяется в метеорологии [9, 10].



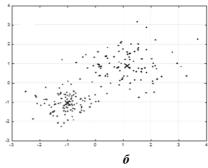


Рис. 1. Случайно распределенные точки на плоскости (a) и их разбиение на два кластера  $(\delta)$  (центры кластеров – центроиды, отмечены крестиками, а принадлежность точек кластерам – цветом).

Примечание. Цветные иллюстрации к статье приведены на сайте журнала.

Обозначим число кластеров BPC3 через K, а множество репрезентативных кривых BPC3 для каждого класса — символом  $\langle R \rangle$ . Тогда задача метода k-средних состоит в минимизации суммарного квадратического отклонения точек BPC3 кластеров от центров этих кластеров  $\langle R \rangle$ :

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{C_j \in \langle C \rangle_k} (C_j - R_k)^2 \to \min, \qquad (1)$$

где  $C_j \in \left\langle C \right\rangle_k - j$  -ая ВРС3, входящая в кластер k -ый кластер  $\left\langle C \right\rangle_k$  , k=1,2,...,K .

Алгоритм метода k-средних разбивает множество элементов векторного пространства  $\{C\}$  на заранее известное число кластеров K и возвращает репрезентативные BPC3 для каждого кластера  $\langle R \rangle$  и множество расстояний  $\{D_{j_k}\}$  от каждой  $j_k$ -ой BPC3, входящей в k кластер до репрезентативной BPC3 этого кластера.

Основная идея алгоритма заключается в том, что на каждой итерации перевычисляется центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы разбиваются на кластеры вновь в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике (типу расстояния).

Алгоритм завершается, когда на какой-то итерации не происходит изменения центра масс кластеров. Это производится за конечное число итераций, так как количество возможных разбиений конечного множества конечно, а на каждом шаге суммарное квадратичное отклонение (1) не увеличивается, поэтому зацикливание невозможно.

В задаче (1) важнейшую роль играет выбираемой произвольно тип метрики – расстояния d(C,C') между многомерными точками двух ВРСЗ: C и C'. На практике наиболее часто используется квадрат (школьной) евклидовой метрики или манхэттенская метрика:

$$d(C,C') = \sum_{1}^{n=N} |C_n - C'_n|.$$
 (2)

Выражение (2) представляет собой сумму абсолютных значений арифметических разностей на соответствующих глубинах значений скорости звука двух ВРСЗ. Большой список расстояний, применяемых в научных исследованиях, представлен в работе [11].

Для оценки результата кластеризации предлагается воспользоваться вычислением нормированной метрики – индекса силуэтов (silhouette index) [12, 13]. Этот индекс позволяет сравнить качество разбиений  $\{C\}$  с разным количеством кластеров K.

Индекс силуэтов s(j) показывает, насколько хорошо каждое BPC3 лежит в своем кластере и вычисляется как

$$s(j) = \frac{a_j - b_j}{\max(a_j, b_j)},\tag{3}$$

где  $a_j$  — мера схожести j -ой кривой BPC3 из  $\{C\}$  со своим кластером,  $b_j$  — мера схожести j -ой кривой BPC3 с ближайшим к ней (но не своим кластером). В качестве меры схожести кривой BPC3 с кластером берется среднее расстояние от кривой BPC3 до всех кривых BPC3 кластера. Для каждой кривой BPC3 из  $\{C\}$  индекс s(j) принимает значение в интервале от -1 до K=2. Значения близкие к -1, показывают, что j -ая кривая BPC3 была отнесена к неверному кластеру. Значения, близкие к 1 показывают, что кластер для j -ой кривой BPC3 определен хорошо. Положительные значения, близкие к нулю, показывают, что BPC3 находятся близко к границе кластера и, соответственно, близко к границе ближайшего кластера. Очевидно, что среднее арифметическое значение индексов всех BPC3 лежит в диапазоне от -1 до 1, причем, чем ближе значение к 1, тем лучше качество полученных кластеров.

Таким образом, первый этап метода состоит в получении нескольких кластеризаций методом k-средних, вычислении для каждой кластеризации среднего значения индекса силуэтов и выбора кластеризации с наибольшим значением среднего индекса силуэтов как наилучшей.

Заметим, что все указанные выше вычислительные методы реализованы во многих программных пакетах, распространяемых с бесплатной лицензией, например, программный пакет R, предназначенный для статистической обработки данных и работы с графикой (это свободная программная среда вычислений с открытым исходным кодом в рамках проекта GNU) [14].

Изложенное позволяет описать предлагаемый метод кластеризации BPC3 в двух вариациях. Одну – для обеспечения акустических задач, а другую – для «естественной» океанографической кластеризации BPC3 в океане.

## Метод кластеризации для обеспечения акустических задач

Входные данные: Множество  $\{C\}$ , состоящее из M BPC3, заданных значениями скорости звука на N одинаковых глубинах.

- 1. Задать максимальное допустимое значение  $D_0$  для всех  $\{D_{j_k}\}$ .
- 2. Положить K=0.

- 2.1. Для K = K+1 вычислить методом k-среднего множество индексов  $\left\{i_j\right\}_K$ , множество репрезентативных BPC3  $\left\{R\right\}_K$  и расстояние от каждого BPC3 до её кластера  $\left\{D_{j_k}\right\}$ . Здесь  $i_j$  (i=1,2,...,k) номер кластера к которому относится j -ое BPC3 (j=1,2,...,M);
- 2.2. Если K>M , то закончить вычисление и возвратить  $K_{\max}$  ,  $\left\{i_j\right\}_{K_{\max}}$  ,  $\left\{R\right\}_{K_{\max}}$  .
- 2.3. Если условие  $\max_{j_k} \left\{ D_{j_k} \right\} \le D_0$  выполняется, то перейти к пункту 3, если условие  $\max_{j_k} \left\{ D_{j_k} \right\} \le D_0$  не выполняется, то перейти к пункту 2.1.
- 3. Выходные данные:  $K_{\max}$ ,  $\left\{i_{j}\right\}_{K_{\max}}$ ,  $\left\{R\right\}_{K_{\max}}$

# Метод «естественной» океанографической кластеризации ВРСЗ в океане

Входные данные: Множество  $\{C\}$ , состоящее из M BPC3, заданных значениями скорости звука на N одинаковых глубинах.

- 1. Задать произвольный конечный набор числа кластеров, например,  $K=2,3,..,L\;,\;L\leq M$  .
- 2. Для каждого значения K из K = 2,3,..,L:
- вычислить методом k-среднего множество индексов  $\{i_j\}_K$  и множество центроидов  $\{R\}_K$ . Здесь  $i_j$  (i=1,2,...,k) номер кластера к которому относится j -ое BPC3 (j=1,2,...,M);
  - вычислить множество индексов силуэтов  $\{s(j)\}_K$ ;
  - вычислить среднее арифметическое значение  $S_K$  по множеству  $\left\{s(j)\right\}_K$  .
  - 3. Найти  $K_{\max}$ , при котором достигается максимальное значение  $\max_K (S_K)$ .

Выходные данные: 
$$K_{\max}$$
,  $\left\{ i_{j} \right\}_{K_{\max}}$ ,  $\left\{ R \right\}_{K_{\max}}$ .

Приведем пример использования метода «естественной» океанографической кластеризации ВРСЗ для данных, полученных дрейфующими буями ARGO в центральной части Атлантического океана. Измерения были выполнены буем № 4901586 в период с 18.07.2016 по 13.08.2016. Число измерений вертикального профиля температуры, солености и давления равно M=191. Схема измерений на акватории представлена на рис. 2a.

По температуре, солености и давлению были вычислены значения скорости звука для каждой станции. Учитывая, что измерительная система ARGO дает значения вертикального профиля температуры и солености с дискретностью около метра по глубине, но значения глубин измерений не выдерживается, все значения скорости звука были приведены к интервалу глубин h = [2-49] с интервалом в  $\Delta h = 1$  метр. Все множество  $\{C\}$  полученных BPC3 представлено на рис. 26.

В качестве метрики было выбрано расстояние (2). Вычисления методом k-средних проводились для числа кластеров в диапазоне  $K = \begin{bmatrix} 2-11 \end{bmatrix}$ . Качество кластеризации для каждого числа кластеров определялось по среднему индексу силуэтов (2). Результаты вычислений свидетельствуют, что при K=2 наблюдается наиболее качественная кластеризация (рис. 3a). Распределение индексов силуэтов для K=2 по всем BPC3 представлено на рис. 36.

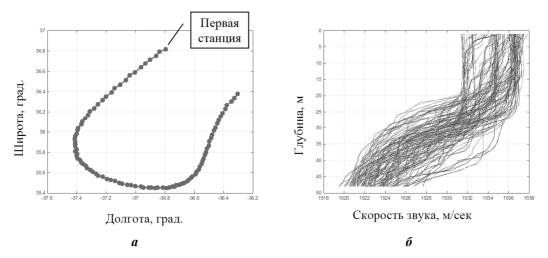


Рис. 2. Схема измерений (a) и графики множества измеренных ВРСЗ (б). См. примечание к рис. 1

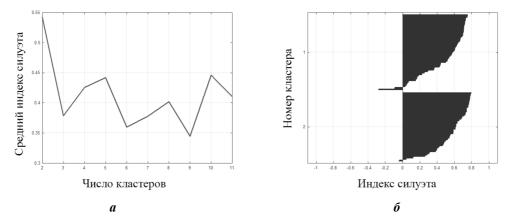


Рис. 3. Графики вычислений индексов силуэтов: а – график средних значений индексов силуэтов для K=[2-11], б – график для всех ВРС3 при K=2 . См. примечание к рис. 1

Результаты кластеризации ВРСЗ по двум классам представлены на рис. 4.

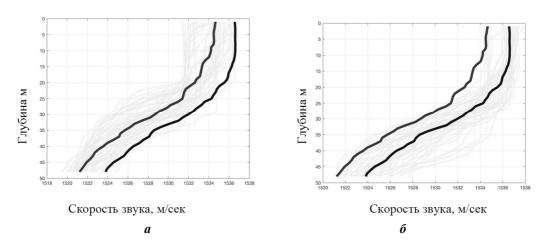


Рис. 4. Графики репрезентативных ВРСЗ для K=2 с соответствующими им кластерами ВРСЗ: a – для кластера 1,  $\delta$  – для кластера 2. См. примечание к рис. 1

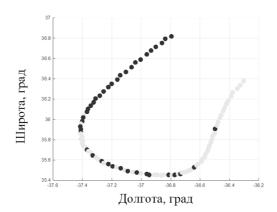


Рис. 5. График разделения ВРСЗ по классам на акватории океана. См. примечание к рис. 1

Таким образом, представлено описание метода кластеризации BPC3 в двух вариациях: для обеспечения акустических задач и для «естественной» океанографической кластеризации BPC3. Метод эффективен в практике автоматизированной обработки больших массивов детальной информации о вертикальном распределении скорости звука в целях типизации и районирования океана по акустическим условиям. Приведенный метод кластеризации пригоден не только к обработке массивов BPC3, но и к любым большим числовым многомерным гидрометеорологическим данным.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Физика океана. Гидродинамика океана / Под ред. В. М. Каменковича, А.С. Монина. М.: Наука, 1978. 456 с.
- 2. Егоров Н.И. Физическая океанография. Л.: Гидрометиздат, 1974. 455 с.
- 3. Зосимов В. В., Лямшев Л. М. Фракталы и скейлинг в акустике // Акустический журнал. -1994. Т. 40. № 5. С. 709-737.

- 4. Гостев В. С., Швачко Р. Ф. Компьютерное моделирование натурного эксперимента по рассеянию звука тонкоструктурными неоднородностями // Акустический журнал. − 2008. − Т. 54. − № 2. − С. 262–266.
- 5. Копыл Е. А., Лысанов Ю. П., Лямшев Л. М. Рассеяние звука случайными фрактальными неоднородностями в океане. // Акустический журнал. 2002. Т. 48. №4. С. 517–522.
- 6. Мандель И. Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1988. 176 с.
- Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en partie // Bull. Acad. Polon. Sci. 1956. C1. III. –
  Vol. IV. P. 801–804.
- 8. David A., Vassilvitskii S. "K-means++: The Advantages of Careful Seeding." SODA '07: Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. –2007. P. 1027–1035.
- Verma V., Bhardwaj S., Singh H. A Hybrid K-Mean Clustering Algorithm for Prediction Analysis // Indian Journal of Science and Technology. 2016, July. Vol. 9(28). P. 1–5
- Mistry V., Patel V. Weather Condition Prediction Using Semi-Supervised Data Mining // Technique International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). –2015, Feb. Vol. 20. No 4. P. 179–183.
- 11. Деза Е., Деза М. М. Энциклопедический словарь расстояний. М.: Наука, 2008. 444 с.
- 12. Rousseeuw P.J. Silhouettes. A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis // Journal of Computational and Applied Mathematics. 1987. Vol. 20. P. 53—65.
- Zaki M. J., Meira Jr. W. Data Mining and Analysis: Fundamental Concepts and Algorithms. Cambridge University Press, 2014. – 562 p.
- 14. The R Project for Statistical Computing URL: https://r-project.org.

# METHOD OF CLUSTERISATION OF THE VERTICAL SOUND VELOCITY IN THE OCEAN

## Y. N. Zhukov («GNINGI» JSC)

The method of clusterisation of the sound velocity in the ocean is described. The method allows to carry out the automated clusterisation of the arrays of the vertical sound velocity distribution and to obtain the representative curves of the vertical sound distribution for the chosen classes.

УДК 001.5:551.46:608

# О ВОЗМОЖНЫХ ПУТЯХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АКВАТОРИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ПАТЕНТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. П. ЛЕНЬКОВ, А. Б. ФЁДОРОВ, В. В. ЧЕРНЯВЕЦ (АО «ГНИНГИ»)

Проанализированы патенты сотрудников АО «ГНИНГИ» в области совершенствования средств и способов исследования водной акватории. По ним определены направления развития технических средств и способов. Отмечена роль патентной информации в выявлении инновационных решений по данным направлениям.

Одной из наиболее острых проблем, связанных с нарушениями состояния водной среды, является ее загрязнение нефтью и продуктами ее переработки (бензин, керосин, мазут и др.). Попадая в водоемы, они подавляют жизнедеятельность флоры и фауны. Так, растворяющиеся в воде фракции нефти являются остро токсичными для подавляющего большинства гидробионтов, а образующаяся на воде нефтяная

пленка препятствует прониканию кислорода в толщу воды, нарушая дыхание водных организмов. В целом крупномасштабные аварийные разливы нефти способны оказывать долгосрочное и губительное воздействие на окружающую среду, включая биоту.

Аварийные разливы могут представлять опасность в первые часы и дни после разлива, а могут, в силу характера распространения нефтяного пятна, климатических особенностей, химического состава нефти и других факторов, которые в каждом конкретном случае являются уникальными, быть опасными в течение многих лет. Все это определяет актуальность проблемы создания надежной системы раннего обнаружения и контроля аварийных разливов нефти. Исследования акваторий также необходимы и на стадии ликвидации разливов для их локализации, блокирования, управления самим процессом ликвидации, включая контроль качества очистки как воды, так, в частности, льда и снега от нефтяного загрязнения.

Исследования состояния акватории представляют собой многоуровневый процесс, осуществляемый с помощью донных станций, космического мониторинга, контактных измерений (взятия проб воды). Средства и способы исследования, используемые как в России, так и в других странах, базируются на соответствующих технологиях и новшествах [1-2].

Как показывает практика проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), чрезвычайно важным является использование патентной информации, роль которой состоит в информационной поддержке инновационных проектов, позволяющей оценить достигнутый технический уровень промышленной продукции и новизну разрабатываемых новшеств.

Технология исследований акваторий по рассматриваемым патентам, как правило, включает размещение в исследуемом районе (в том числе — на дне водоемов) устройств регистрации параметров водной среды, а также передачу данных измерений по каналам связи на контрольный пункт для их обработки и анализа [3—4]. В ряде случаев передача данных измерений выполняется на локальный (промежуточный) контрольный пункт (ЛКП) с дальнейшей трансляцией данных на центральный контрольный пункт [3]. В качестве ЛКП применяются плавающие (всплывающие) буиретрансляторы, связанные с наземным центральным контрольным пунктом линиями кабельной [3], радио- или спутниковой связи.

Следует учитывать, что направления исследования морей, рек, озер, водохранилищ и т. д. традиционно классифицируются по категориям (группам), основными из которых являются [2]:

- 1) геофизические исследования (акустический мониторинг акватории и ее дна),
- 2) экологические исследования качества воды (в том числе ее загрязненности) посредством измерения физико-химических параметров.

Указанные направления исследований акваторий отличаются специфическими признаками, обусловленными особенностями технологии наблюдений водной среды. Эти выявленные различия и особенности можно проследить по запатентованным сотрудниками АО «ГНИНГИ» в последнее время техническим решениям:

- 1) первая группа (геофизические исследования) [4-6];
- 2) вторая группа (экологические исследования, в первую очередь, качества водной среды) [3, 7–8].

Учитывая положительную оценку технических решений в предложенных патентах, представляется целесообразным более подробно рассмотреть их отличитель-

ные признаки с целью определения перспективных направлений развития технических средств и технологий исследования водной среды.

## І. Направления геофизических исследований

1. Способ определения комплексных данных о состоянии океана [4].

Способ включает инструментальное измерение давления и температуры в водной среде посредством многоканальных устройств, установленных на носителях, размещаемых на морском дне и в морской среде.

Отличие рассматриваемого способа от аналогов состоит в оригинальном конструктивном построении отдельных устройств и в операциях использования. Носители многоканальных устройств регистрации, размещенные в водной среде, устанавливают с образованием веерных зон по азимуту и ярусных зон по углу места с последующим их всплытием на поверхность.

Такое построение средств определяет новизну данного способа, обеспечивая расширение функциональных возможностей оперативного наблюдения за состоянием океана с одновременным повышением достоверности полученной исходной информации.

2. Система освещения подводной обстановки [5].

Система включает группу технических средств – многолучевые эхолоты, параметрические профилографы, блок обработки акустических сигналов.

В отличие от аналогов для каждого многолучевого эхолота дополнительно вводится параметрический профилограф для профилирования рельефа дна и донных осадков. Размещение антенны накачки такого профилографа выполняется на дрейфующих или заякоренных буях на разных горизонтах по глубине акватории на расстояниях, составляющих не более 8000 м друг от друга.

Использование указанных технических средств, а также их пространственное расположение позволяют существенно расширить зону освещения подводной обстановки и являются ее отличительными признаками, определяющими новизну изобретения.

3. Система освещения ледовой обстановки и предотвращения воздействия ледовых образований на морские объекты хозяйственной деятельности [6].

Система включает средства исследования гидрометеорологической обстановки в регионе, средства определения характеристик ледовых образований и средства защиты от воздействия ледовых образований.

В отличие от аналогов данная система дополнительно содержит ряд устройств: командно-управляющий комплекс, соединенный со средствами мониторинга гидрометеорологической обстановки в регионе размещения морских объектов; средства определения характеристик ледовых образований; средства защиты от воздействия ледовых образований; функционально-логический блок определения критических параметров воздействия ледовых образований на морской объект. Их применение обеспечивает повышение надежности защиты морских объектов хозяйственной деятельности в периоды льдообразования, дрейфа и торошения ледяных полей.

Конструктивно система выполнена в виде подводных и надводных модулей, при этом подводные модули снабжены холодильными агрегатами, надводные модули выполнены в виде выдвижных конструкций и беспилотных летательных аппаратов.

### II. Направления экологических исследований

1. Способ экологического контроля загрязнений водной среды, донных отложений и атмосферы вдоль трассы магистральных трубопроводов, уложенных на дне водоемов, и устройство для его осуществления [3].

Способ заключается в реализации ряда методических приемов — размещении устройств регистрации в природной среде на нескольких горизонтах, регистрации сигналов гидрофизических полей с последующим анализом проб воды, грунта и воздуха и обработкой информации. Сущность технического решения способа основана на непрерывном анализе информации о состоянии окружающей среды в реальном масштабе времени по измеренным параметрам не только водной среды, но и по измеренным параметрам всего спектра окружающей среды: атмосферы, грунта, биосферы в сочетании с измеренными параметрами объекта исследования.

В отличие от аналогов использование способа обеспечивает расширение функциональных возможностей экологического контроля загрязнений с повышением достоверности контроля. Это достигается за счет дополнительного измерения временных вариаций горизонтальных и вертикальных компонент гидрофизического и геофизического полей в контролируемом регионе в разнесенных пунктах, а также регистрации и последующей комплексной обработки всего спектра параметров природной среды при воздействии на нее динамических характеристик объекта исследования.

2. Система измерения гидрологических параметров на больших глубинах [7].

Система включает обрывной океанографический зонд, электронные средства преобразования и синхронизации измеряемых гидрологических параметров на больших глубинах, содержащие функционально-логический блок для выработки и автокомпенсации показателя преломления по каждым двум из трех измеряемых гидрологических параметров.

В отличие от аналога оригинальная схема построения системы измерения гидрологических параметров на больших глубинах обеспечивает повышение достоверности регистрируемых параметров водной среды за счет использования лазерной техники. При этом возбуждение лазера осуществляют на двух или нескольких длинах волн. Эталонный измеритель температуры и давления, выполненный в виде лазерного флюорометра, определяет отличительные признаки системы и ее новизну.

3. Система обнаружения и мониторинга загрязнений морского нефтегазового промысла [8].

Система реализует сеть дистанционных детекторов загрязнений, часть которых установлена на нефтегазодобывающей платформе, и сеть установленных на удалении от нефтегазодобывающей платформы автоматических плавучих комплексов мониторинга (КМ). При этом каждый КМ содержит набор датчиков регистрации углеводородов и датчики, измеряющие физико-химические и гидрологические параметры воды.

В отличие от аналогов повышение надежности и расширение функциональных возможностей мониторинга загрязнений морского нефтегазового промысла достигается за счет того, что система включает в себя сеть дистанционных детекторов загрязнений, в частности, флуоресцентных лидаров и автоматических плавучих комплексов мониторинга. Дополнительное включение биосенсора позволяет осуществлять непрерывный контроль тяжелых металлов в воде. Датчики ядерно-магнитного резонанса, электронного парамагнитного резонанса, стационарный идентификационный комплекс и центр для обработки результатов обеспечивают последовательную

расшифровку резонансных распознавательных спектров искомых веществ, идентификацию объектов и определение глубин их заноса грунтом.

#### Выводы

- 1. Основными направлениями исследований загрязненных водоемов (морей, рек, озер, водохранилищ и т. д.) являются геофизические (акустический мониторинг акватории и ее дна) и экологические (изучение качества воды).
- 2. Указанные направления исследований акваторий отличаются специфическими признаками. В частности, особенностью предложенных техникотехнологических решений как в области экологических исследований акваторий, так и геофизических, является использование значительного числа дополнительных устройств (устройства регистрации акустических сигналов, гидрофоны, командноуправляющий комплекс и другие) и новых способов их применения.
- 3. Стремление к расширению числа измеряемых параметров и, соответственно, к увеличению числа датчиков [3–8] в общем случае приводит к усложнению устройств исследования акваторий. В то же время увеличение числа датчиков расширяет функциональные возможности обследования акваторий при повышении информативности, надежности и достоверности данных измерений, увеличению технического ресурса используемых средств, тем самым определяя новое качество технического результата.

Это свидетельствует о том, что при выборе устройств и способов исследования акваторий следует критически учитывать возможности каждого из рассматриваемых патентов для достижения конкретно поставленных задач исследований водной среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Милн П. Х. Гидроакустические системы позиционирования: Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1989.-232 с.
- 2. Геоэкологический мониторинг морских нефтегазоносных акваторий / Л. И. Лобковский, Д. Г. Левченко, А. В. Леонов и др. М.: Наука, 2005. 346 с.
- 3. Патент РФ 2331876. Способ экологического контроля загрязнений водной среды, донных отложений и атмосферы вдоль трассы магистральных трубопроводов, уложенных на дне водоемов, и устройство для его осуществления / Алексеев С. П., Бродский П. Г., Зверев С. Б. и др. Заявл. 29.08.2006. Опубл. 20.08.2008. Бюл. № 23.
- 4. Патент РФ 2282217. Способ определения комплексных данных о состоянии океана / Парамонов А. А., Ястребов В. С., Чернявец В. В. и др. Заявл. 30.12.2004. Опубл. 20.08.2006. Бюл. № 23.
- 5. Патент РФ 2538440. Система для освещения подводной обстановки / Травин С. В., Бродский П. Г, Зеньков А. Ф. и др. Заявл. 25.03.2013. Опубл. 10.01.2015. Бюл. № 1.
- 6. Патент РФ 2583234. Система освещения ледовой обстановки и предотвращения воздействия ледовых образований на морские объекты хозяйственной деятельности / Солощев А. Н., Аносов В. С., Лобанов А. А. и др. Заявл. 31.12.2014. Опубл. 10.05.2016. Бюл. № 13.
- Патент РФ 2571292. Система измерения гидрологических параметров на больших глубинах / Дроздов А. Е., Мирончук А. Ф., Шарков А. М. и др. Заявл. 04.07.2014. Опубл. 20.12.2015. – Бюл. № 35.
- 8. Патент РФ 2587109. Система обнаружения и мониторинга загрязнений морского нефтегазового промысла / Бродский П. Г., Балесный Ю. Н., Леньков В. П. и др. Заявл. 16.04.2015. Опубл. 10.06.2016. Бюл. № 16.

# ON POSSIBLE WAYS TO IMPROVE THE MEANS AND METHODS OF EXPLORATION OF THE WATER AREA USING THE RESULTS OF THE PATENT INFORMATION

## V. P. Lenkov, A. B. Fedorov, V. V. Chernyavets («GNINGI» JSC)

The patents of the «GNINGI» JSC employees in the sphere of improvement of the means and methods used to explore the water areas are analysed. Using them as a basis, the directions of development for the technical means and methods are determined. The role of the patent information in revealing the innovation solutions in these directions is pointed out.

# ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.582

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Т. Н. ЗАДОРОЖНАЯ, В. П. ЗАКУСИЛОВ, (ВУНЦ ВВС «ВВА»)

В работе исследуются тенденции изменения температуры воздуха, которые произошли за последние десятилетия в северном полушарии в целом, отдельно по широтам, долготам, высотам и месяцам года.

Человечество с давних времен волновали колебания климата, так как от него зависит эффективность планирования деятельности в различных областях народного хозяйства. В последние годы интерес к этому вопросу возрос. Однако в связи с недостаточным пониманием процессов и влияющих факторов в атмосфере на временных масштабах порядка месяца и более разрабатываемые прогнозы климата не в достаточной степени удовлетворяют требованиям, которые к ним предъявляются.

Изменение статистических свойств атмосферы в ходе ее эволюции определяется поведением климатической системы, которая развивается под действием физических законов, и не всегда известно, какие из факторов могут иметь первостепенное значение для конкретного промежутка времени. Особую актуальность этот вопрос приобрел в настоящее время, когда крупномасштабные климатические аномалии, достигшие кульминации на Европейской территории в 1972 и 2010 гг., продемонстрировали существование потенциальной неустойчивости в климатической системе, по крайней мере, в региональных масштабах.

Одним из показателей климата и его изменений является температура воздуха, оказывающая существенное влияние на различные стороны человеческой деятельности. Особенно чувствительны к изменениям климата арктические районы. Морская деятельность северных районов находится в значительной зависимости от температурного режима и ледовых условий. С ними связаны своевременное проведение навигации, эффективность и безопасность судоходства, транспортных перевозок, перспективы развития и сохранность инфраструктуры. В связи с этим получение заблаговременных сведений о направлении изменения температурного режима как в целом по полушарию, так и в отдельных его регионах, является задачей актуальной.

Впервые фундаментальный вопрос об устойчивости (транзитивности) климата поднял Э. Лоренц [1]. Одной из задач изучения климата является определение периодов, в течение которых статистические свойства климатического ансамбля могут сохраняться, или как часто они могут меняться. Современная процедура исследования климата в этом направлении заключается в численном интегрировании климатических

рядов по выбранной модели атмосферы. Однако использование данного подхода для изучения предсказуемости на месяц и более — задача в настоящее время пока не выполнимая. В этом случае целесообразнее использовать статистический подход, который способен помочь выявить некоторые закономерности происходящих процессов.

В настоящее время данной проблеме посвящено много исследований [2–4], однако увеличивающаяся в настоящее время скорость изменения климата, требует постоянного проведения мониторинга как за направлением тенденции, так и за ее интенсивностью.

Целью данного исследования является выявление тенденций в многолетнем ходе распределения глобальной температуры воздуха в горизонтальном и вертикальном направлениях, а также в годовом ходе, на основе имеющейся в настоящее время информации.

Информационной базой при выполнении настоящей работы служили данные о температуре воздуха, полученные с серверов Мирового банка данных реанализов R-1 и R-2 (NCAR/NCAP и NCAP/DOE) [5] на основных изобарических поверхностях 1000, 850, 700, 500, 300, 200 и 100 гПа в узлах регулярной сетки с шагом 2,5°. В результате используемый массив данных для одного изобарического уровня представлен матрицей  $T(\phi \times \lambda \times j)$ . Здесь  $\phi$  — широта ( $\phi$  = 1,...,37);  $\lambda$  — долгота ( $\lambda$  = 1,...,144); j — порядковый номер года в выборке. Период наблюдений составил 51 год — с 1958 по 2008 гг.

В последних Оценочных докладах (ОД-РФ-1 и 2) по изменению климата за 2008 и 2014 гг. и в докладах Межправительственной группы экспертов в качестве норм, как правило, использовался базовый период климатических норм (1960—1990 гг.). Вместе с тем в этих же докладах приводятся исследования трендов по нормам, рассчитанным и за иные промежутки времени. В этих случаях иногда менялись не только величина тренда, но и его знак.

В данном исследовании в целях выявления возможных закономерностей предпринята попытка проанализировать тенденции глобальной аномалии температуры на основании норм, рассчитанных за период с 1958 по 2008 гг. На рис. 1 представлен временной ход осредненных по полушарию многолетних значений аномалий температуры воздуха по данным января.

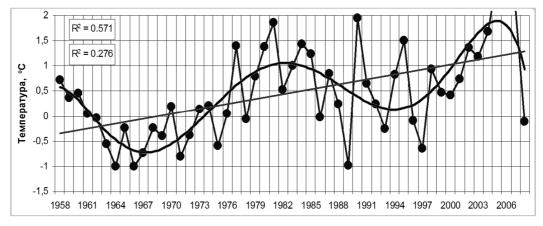


Рис. 1. Многолетний ход аномалии температуры воздуха в Северном полушарии. Январь (тренды: линейный  $R^2$ =0,276; нелинейный  $R^2$ =0,571)

Как следует из рисунка, в ходе среднемесячной аномалии глобальной температуры воздуха в северном полушарии наблюдался колебательный процесс. Ход кривой, аппроксимированный полиномом шестой степени ( $R^2 = 0.57$ ), визуально показывает, что период колебаний может составлять 24 года.

Для оценки значимости наблюдаемого колебания в работах [6, 7] к исходному ряду применена процедура разложения в ряд Фурье, которая позволила обнаружить значимые компоненты, включающие низкочастотную составляющую с периодом 24—25 лет и высокочастотную – с периодом 3,5—3,7 года.

Дополнительно к данному ряду была применена процедура анализа выборочных главных компонент (модель «Гусеница»), позволившая выявить достаточно четкую линию тренда (медленно изменяющуюся тенденцию с периодом 24 года), а также короткопериодные колебания с периодом ~3,6 года.

Из рисунка также следует, что колебания проходили на фоне положительного линейного тренда. Средняя скорость повышения температуры составила 0,32 °C/10 лет. Эта величина близка к средним значениям тренда, рассчитанным для северного полушария по данным метеорологической службы Великобритании за последние несколько десятилетий (0,328 °C/10 лет) [8]. Хотя проводить сравнение сложно, так как в упомянутой работе рассматриваются годовые аномалии и сглаженные по 11-летнему периоду.

Характер изменения температуры для остальных календарных месяцев года представлен на рис. 2. Для большей наглядности временной ход аппроксимирован полиномом шестой степени, который свидетельствует о том, что в тенденции изменения температуры наблюдается годовой ход. С наибольшей скоростью повышение температуры происходит в месяцах переходного периода. Основной максимум  $(0.58~^{\circ}\text{C}/10~\text{лет})$  отмечается в апреле, второй  $(0.51~^{\circ}\text{C}/10~\text{лет})$  – приходится на ноябрь. Минимальный рост наблюдается в июле и составляет  $0.27~^{\circ}\text{C}/10~\text{лет}$ .

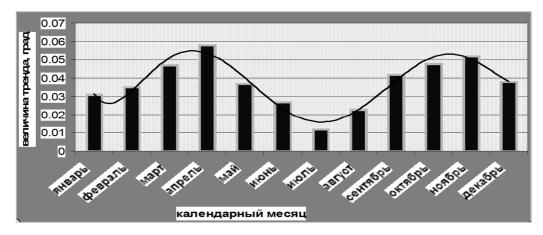


Рис. 2. Скорость изменения среднемесячной температуры воздуха в различные календарные месяцы

Вклад тренда в дисперсию по месяцам колеблется от 3 % зимой до 30 % весной. По сравнению с результатами расчетов, представленных в ОД-Р $\Phi$ -2008, в данном случае менее значимым оказался летний период [9], для остальных сезонов результаты исследования близки.

В целях детализации для выявления региональных особенностей использовались средние месячные значения температуры воздуха, осредненные по широтным кругам, кратным  $10^{\circ}$  с. ш. и усредненные по каждой широте за период 1958-2008 гг. Эти данные сравнивались со среднеширотными значениями температуры, которые рассчитывались за период с 1900 по 1960 гг. [10]. Разности температур между значениями до и после 1960 г. по каждой широтной зоне представлены на рис. 3, из которого отчетливо видно, что повышение температуры по широтам происходит довольно неравномерно. Наибольшее повышение температуры имело место в высоких широтах, максимум отмечен на полюсе, где разность температур за исследуемый период составила около +5 °C. Второй экстремум несколько ниже (+4 °C), отмечается на широтах  $65-70^{\circ}$  с. ш. При перемещении к низким широтам скорость повышения температуры замедляется, а начиная с  $\phi = 30^{\circ}$  с. ш. и до экватора включительно имеет место даже понижение температуры. Максимальное понижение отмечено на экваторе (-1,0 °C), что согласуется и с результатами других исследований.

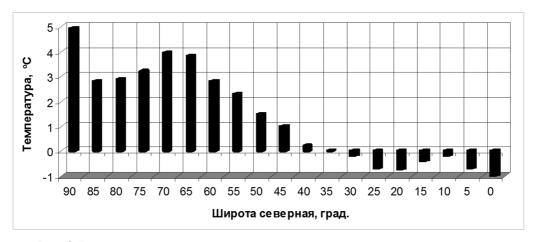


Рис. 3. Распределение разностей температур по широтам между значениями до и после 1960 г.

Таким образом, температура в полярных районах повышалась, а экваториальные широты охлаждались. Следовательно, контраст температур между высокими и низкими широтами уменьшался. Это способствовало тому, что работа тепловой машины первого рода (контраст температур между полюсом и экватором) была направлена на уменьшение интенсивности зональной циркуляции и увеличение циркуляционных процессов меридиональных форм (иногда блокированных процессов), которые увеличивают вероятность появления опасных явлений погоды и даже стихийных бедствий.

В климатическом плане представляет интерес, как ведет себя тенденция изменения температуры на различных уровнях атмосферы, и как это может сказаться на колебаниях климата. На рис. 4 представлен ход многолетнего изменения температуры воздуха в нижней стратосфере (100 гПа) для января за период с 1958 по 1998 гг.

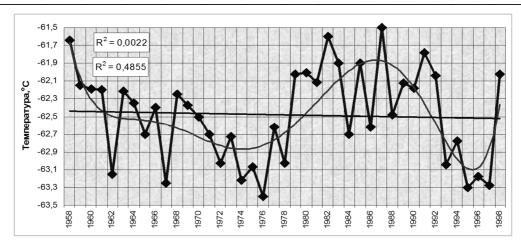


Рис. 4. Многолетний ход среднемесячной температуры воздуха в нижней стратосфере. Январь

Проведенный на рисунке линейный тренд является слабо отрицательным, т. е. температура воздуха в течение исследуемого промежутка времени понижается. Хотя это понижение и не велико, однако данная тенденция устойчива. Аппроксимация кривой с помощью полинома шестой степени позволяет констатировать, что на данной поверхности также имеет место колебательный процесс, который выражен еще более четко, чем у земли, однако из-за малой выборки периодичность установить не удается.

В целях более детального анализа на рис. 5 представлен характер распределения угла наклона линейного тренда по высотам, который описывает направление тенденции и скорость изменения температуры на различных уровнях атмосферы – от поверхности Земли до нижней стратосферы.

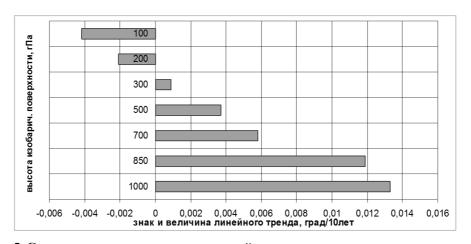


Рис. 5. Скорость изменения среднемесячной температуры воздуха на стандартных изобарических поверхностях в тропосфере и нижней стратосфере. Январь

Из рисунка видно, что наибольшая скорость повышения температуры отмечается на поверхности 1000 гПа. С увеличением высоты изобарической поверхности

тенденция к росту температуры сохраняется, но скорость ее существенно замедляется, а начиная с поверхности АТ-200 гПа знак угла наклона меняется на противоположный, который сохраняется и на более высоких поверхностях. Таким образом, механизмы скорости изменения температуры в тропосфере и стратосфере работают в противоположных направлениях. Аналогичные вертикальные распределения трендов отмечаются и в работах других исследователей, особенно в последнее время.

Результаты анализа указывают на то, что с течением времени контраст температуры между тропосферой и стратосферой увеличивается, в результате чего увеличивается энергетическое состояние термодинамической машины, действие которой направлено на увеличение интенсивности вертикальной составляющей атмосферной циркуляции и увеличение повторяемости меридиональных процессов. Такое состояние должно неизбежно привести к увеличению повторяемости конвективных, а, следовательно, опасных явлений погоды, о чем свидетельствуют постоянные сообщения. Так, если еще 10 лет назад по земному шару за год регистрировалось около 200 стихийных бедствий, то только в 2014 г. их было отмечено 569.

Распределение величины линейного тренда по долготам представлено на рис. 6. Для удобства анализа график линейного тренда совмещен с географической картой.

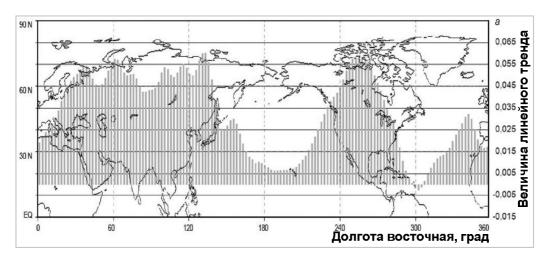


Рис. 6. Распределение величины линейного тренда по долготам

Анализ рисунка свидетельствует о том, что температура воздуха, сглаженная по долготе за исследуемый период, практически повсеместно повышалась. Однако скорость этого повышения на северном полушарии не одинакова.

Ее величина связана с характером подстилающей поверхности. Самые высокие скорости повышения температуры отмечаются над континентальными поверхностями. Особенно отчетливо это просматривается на территории Евроазиатского континента  $(0.56-0.60~{\rm C}~/~10~{\rm net})$  и центральными районами Североамериканского континента. Минимальные скорости роста отмечаются над центральными частями океанов, приобретая в центральной части акватории Атлантики отрицательные значения  $(-0.02~{\rm C}~/~10~{\rm net})$ . На однопроцентном уровне значимости их можно считать значимыми.

Наличие такого распределения трендов между океанами и континентами создает условия для увеличения контрастов температуры над восточными районами континентов и, соответственно, повышенной частоте возникновения циклонической деятельности, вызывающей опасные явления погоды и даже стихийные бедствия.

Проведенные исследования позволили установить скорость и направление изменения глобальной температуры воздуха в различных районах северного полушария, на разных высотах и в различных календарных месяцах, что можно использовать в прогностических целях при планировании перспективных мероприятий и выполнении повседневных задач в различных отраслях экономики.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Lorenz E. The general circulation of the atmosphere. WMO Publiction, 1967. 165 c.
- 2. Борзенкова И. И., Винников К. Я., Спирина Л. П., Стехновский Д. И. Изменение температуры воздуха северного полушария за период 1881–1975 гг. // Метеорология и гидрология. 1976. № 7. С. 27–35.
- 3. Винников К. Я. Некоторые проблемы мониторинга глобального термического режима Северного полушария / К. Я. Винников, К. М. Лугина // Метеорология. − 1982. № 11. С. 12–15.
- 4. Винников К. Я. Современные изменения глобального климата.: Обзор. информ. // Сер. Метеорология. Обнинск, 1985. Вып. 8. С. 24–58.
- NCEP/DOE AMIP II Reanalysis [Электронный ресурс]. URL: http:// www. cdc. noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis2.html.
- 6. Задорожная Т. Н., Шипко Ю. В. Моделирование климатических колебаний глобальной температуры воздуха северного полушария. Материалы XX Международной конференции: «Информатика, проблемы, методология технологий» (11–12 февраля 2010 г.). Воронеж: изд. ВГУ, 2010. С. 268–271.
- 7. Выявление и учет трендовых составляющих и гармонических колебаний в целях долгосрочного прогнозирования температуры воздуха. Материалы VI Международной научно-практической конференции: Обеспечение безопасности в чрезвычайных ситуациях (10 декабря 2010 г., г. Воронеж, ВГТУ, 2010). Воронеж: ВГТУ, 2011. С. 137—143.
- 8. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. М.: Росгидромет, 2014. 94 с.
- 9. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 227 с.
- 10. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Структура и изменчивость наблюдаемого климата. Температура воздуха на уровне моря. Северное полушарие. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 72 с.

# MODERN SPACE-TIME TREND CHANGES IN GLOBAL AIR TEMPERATURE OF THE NORTHERN HEMISPHERE

### T. N. Zadorozhnaya, V. P. Zakusilov (MIRC of the air force «VVA» (Voronezh))

This paper investigates the tendencies of air temperature changes that have occurred over recent decades in the Northern hemisphere as a whole, separately for latitudes, longitudes, heights and months of the year.

УДК 551.501.74

# ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

**А. А. БОРИСОВ, Ю. В. КУЛЕШОВ, А. Б. МАКОВ** (ВКА имени А. Ф. Можайского)

Разработана математическая модель показателя эффективности функционирования специализированной системы гидрометеорологического обеспечения, учитывающая ее структуру, состав и выполняемые функции.

#### Введение

Известно, что результат функционирования вооружения и военно-специальной техники (ВВСТ) во многом определяется гидрометеорологической обстановкой, складывающейся в физико-географическом районе их применения. Ужесточение требований к условиям эксплуатации поставляемых в ВС РФ новых высокотехнологичных образцов ВВСТ лишь подтверждает данное суждение. В связи с этим проблема обеспечения требуемого уровня качества данных о состоянии геосфер до настоящего время не утратила своей актуальности, особенно в районах с экстремальными природными условиями.

В разное время проблемой организации гидрометеорологического обеспечения (ГМО) хозяйственной деятельности человека в СССР и РФ занимались такие отечественные ученые, как О. А. Дроздов [1], Е. С. Рубинштейн [2], Э. И. Монокрович [3], Р. Л. Каган [4], О. М. Покровский [5, 6], Я. Ю. Альшанский [7] и другие авторы. В своих работах они исследовали проблемы рационализации наблюдательных сетей, оценивания качества гидрометеорологической информации и основы ценообразования в гидрометеорологии. Однако выполненные работы посвящались исследованию какого-либо одного аспекта ГМО, в совокупности же проблема организации ГМО, разработки оптимальной системы ГМО, оценивания её эффективности и качества авторами не ставилась и не рассматривалась.

Очевидно, что качество гидрометеорологической и геофизической информации (ГМИ) напрямую зависит от используемых технологий и средств наблюдений и измерений, сбора, обработки и анализа ГМИ, иными словами, — от качества системы гидрометеорологического обеспечения (СГМО), которое тем выше, чем выше эффективность ГМО.

Эффективность операции характеризуется степенью соответствия полученных результатов ее цели [8], следовательно, максимальной эффективностью ГМО и наибольшим качеством будет обладать СГМО, в наибольшей степени приспособленная к достижению цели ГМО, т. е. специализированная СГМО (ССГМО), спроектированная для ГМО конкретных видов ВВСТ. При этом в достижении требуемого уровня эффективности ГМО при разработке ССГМО немаловажную роль играет учет свойств внешней среды, в которой она будет функционировать. Одним из элементов внешней среды являются геосферы (атмосфера, гидросфера, литосфера, околоземное космическое пространство), определяющие такие требования к ССГМО, как состав

измерительной аппаратуры, предельно-допустимые условия эксплуатации технических средств, спецификацию методов обработки ГМИ и др.

Вывод о степени достижения цели ГМО выносится по результатам оценивания соответствующего показателя эффективности, в качестве которого в практических приложениях часто используется вероятность достижения цели операции.

Разработка сложных технических систем с наперед заданными техническими характеристиками относится к задачам синтеза, решаемым в рамках таких дисциплин, как системотехника, исследование операций, теория эффективности целенаправленных процессов.

## Модель специализированной системы гидрометеорологического обеспечения

Решение задач синтеза предполагает разработку проектировщиком математической модели ССГМО, позволяющей судить о верности используемых технических решений при проектировании системы. В качестве такой модели целесообразно использовать модель показателя эффективности функционирования системы, определяемого через вероятность достижения цели  $\Gamma$ MO, а именно получения потребителем  $\Gamma$ MИ требуемого качества.

Исходя из целей и задач, решаемых ССГМО, целесообразно включить в ее состав следующие подсистемы:

- гидрометеорологических наблюдений;
- сбора и распространения ГМИ;
- обработки и анализа ГМИ.

Каждой из вышеуказанных подсистем реализуется процесс, связанный с получением или обработкой ГМИ, от эффективности которого зависит эффективность функционирования ССГМО в целом. Тогда эффективность ГМО можно представить следующим выражением:

$$P(\hat{I}) = P(\hat{O})P(\hat{C})P(\hat{F}), \tag{1}$$

где  $P(\hat{I})$  — вероятность того, что потребитель получил ГМИ требуемого качества;  $P(\hat{O})$  — вероятность того, что подсистемой гидрометеорологических наблюдений правильно диагностирована гидрометеорологическая обстановка на всей территории ответственности ССГМО;  $P(\hat{C})$  — вероятность того, что подсистемой сбора и распространения ГМИ правильно осуществлены сбор и вторичная обработка принятого объема ГМИ;  $P(\hat{F})$  — вероятность того, что подсистемой обработки и анализа ГМИ разработана достоверная гидрометеорологическая продукция (специализированный прогноз гидрометеорологических условий в районе применения ВВСТ, штормовое предупреждение, обзор ледовой обстановки, климатическая справка и др.).

При практическом применении формулы (1) основная трудность заключается в определении конкретного вида входящих в выражение (1) вероятностей событий. Для установления соответствующих им законов распределения необходим детальный анализ процессов, протекающих в ССГМО. Ввиду того, что получение первичной ГМИ от подсистем наблюдения имеет основополагающее значение для дальнейшей работы всей ССГМО, в статье основное внимание сосредоточено на особенностях определения вероятностей достижения цели функционирования подсистемы гидрометеорологических наблюдений.

Анализ особенностей применения различных образцов ВВСТ позволяет сделать вывод о том, что первичная ГМИ должна характеризовать состояние тех геосфер, в которых планируется применение обеспечиваемых ВВСТ. Поэтому диагностика состояния геосфер должна осуществляться одновременно несколькими подсистемами наблюдения. Тогда событие  $\hat{O}$  и соответствующую ему вероятность  $P(\hat{O})$  следует представить как комбинацию нескольких событий, или, говоря в терминах теории вероятности, представить в качестве пересечения нескольких событий. Выражение для вычисления вероятности  $P(\hat{O})$  при учете влияния на образец ВВСТ факторов всех геосфер может быть представлено в виде выражения:

$$P(\widehat{O}) = P(\widehat{AT})P(\widehat{G})P(\widehat{LT})P(\widehat{S}), \tag{2}$$

где  $P(\widehat{AT})$  — вероятность того, что в районе ответственности ССГМО было правильно диагностировано состояние атмосферы;  $P(\widehat{G})$  — вероятность того, что в районе ответственности ССГМО было правильно диагностировано состояние гидросферы;  $P(\widehat{LT})$  — вероятность того, что в районе ответственности ССГМО было правильно диагностировано состояние гидрологических объектов суши (озер, рек, болот);  $P(\widehat{S})$  — вероятность того, что в стратегической космической зоне было правильно диагностировано состояние околоземного космического пространства. Очевидно, что набор множителей в правой части выражения (2) определяется видом проводимой операции и введенными в действие ВВСТ.

Диагностирование состояний геосфер осуществляется с помощью следующих подсистем наблюдения (измерения):

- метеорологической;
- аэрологической;
- радиометеорологической;
- гидрологической;
- морской гидрометеорологической береговой;
- морской корабельной (судовой);
- авиационной разведки погоды;
- авиационной ледовой разведки;
- бортовой диагностической аппаратуры на космических аппаратах;
- метеорологической космической;
- ионосферного зондирования.

При этом известно, что для гарантированной диагностики характеристик любой из геосфер необходимо использование более чем одной подсистемы наблюдения. Тогда вероятность диагностики состояния геосферы будет определяться выражением:

$$P(\widehat{N}) = \sum_{k}^{m} P(\widehat{H}_{Nk}) P(\widehat{N} / \widehat{H}_{Nk}), \tag{3}$$

где  $N \in \{AT, G, LT, S\}; P(\widehat{H}_{Nk})$  – вероятность события, связанного с тем, что k-ая комбинация подсистем наблюдения выполнила задачу диагностики состояния гео-

сферы  $N; P(\widehat{N}/\widehat{H}_{Nk})$  — условная вероятность события, связанного с тем, что диагно-

стика состояния геосферы N была правильно осуществлена k-ой комбинацией подсистем наблюдения; m — количество комбинаций подсистем наблюдения за геосферой N.

Ввиду того, что наблюдения за геосферой N осуществляются подсистемами независимо друг от друга, значение  $P(\widehat{H}_{Nk})$  может быть определено выражением следующего вида:

$$P(\hat{H}_{Nk}) = \prod_{i \in \{i\}_k} P_{B3}^{(i)} \prod_{i \notin \{i\}_k} (1 - P_{B3}^{(i)}), \tag{4}$$

где i — индекс рассматриваемой подсистемы наблюдения за геосферой N; k — индекс варианта рассматриваемой комбинации подсистем наблюдений за геосферой N, выполнивших задачу диагностики;  $\{i\}_k$  — множество индексов систем наблюдения за геосферой N, входящих в k-ый вариант комбинации;  $\prod_{i\in\{i\}_k} P_{\mathrm{B3}}^{(i)}$  — вероятность выполнения задачи i-ой системой наблюдения.

Для вычисления условной вероятности  $P(\widehat{N}/\widehat{H}_{Nk})$  необходимо произвести рас-

чет вероятности правильной диагностики состояния геосферы N одной подсистемой наблюдения  $P(\widehat{N}/\widehat{H}_{Ni})$ .

В качестве примера рассмотрим вариант расчета вероятности  $P(\widehat{AT}/\widehat{H}_{ATi})$  пра-

вильной диагностики состояния атмосферы (AT) средствами подсистемы метеорологических наблюдений, состоящей из распределенных по территории района ответственности за ГМО метеорологических станций и постов, осуществляющих метеорологические наблюдения в единые сроки и по одной программе наблюдений.

В соответствии с положениями теории эффективности целенаправленных процессов (ТЭЦП), изложенными в работе [1], вероятность правильной диагностики состояния атмосферы средствами подсистемы метеорологических наблюдений может быть представлена выражением:

$$P(\widehat{AT}/\widehat{H}_{ATi}) = P[(\hat{y}_1 \ge \hat{z}_1) \cap (\hat{y}_2 \le \hat{z}_2) \cap (\hat{y}_3 \le \hat{z}_3)], \tag{5}$$

где  $\hat{y}_1$  – показатель целевого эффекта производства метеорологических наблюдений;  $\hat{y}_2$  – показатель ресурсоемкости производства метеорологических наблюдений;  $\hat{y}_3$  – показатель оперативности производства метеорологических наблюдений,  $\hat{z}_1,\hat{z}_2,\hat{z}_3$  – соответствующие пороговые значения показателей  $\hat{y}_i$ , i=1(1)3.

В рассматриваемом случае в качестве  $\hat{y}_1$  предлагается использовать показатель (v), характеризующий степень выполнения программы метеорологических наблюдений на метеорологических станциях и постах сети, т.е.

$$v = \frac{V_{\text{вып}}}{V_{\text{устан}}},\tag{6}$$

где  $V_{\text{вып}}$  — объем выполненных метеорологических наблюдений на станциях и постах;  $V_{\text{устан}}$  — объем наблюдений, установленный программой производства наблюдений на станциях и постах,  $0 \le v \le 1$ .

В качестве показателя  $\hat{y}_2$  предлагается использовать показатель  $g_{\partial}$  плотности функционирующих станций метеорологической сети наблюдений в районе ответственности за ГМО:

$$g_{\partial} = q \cdot g,\tag{7}$$

где  $q = {}^{N_{\partial}}/_{N}$  — относительное количество действующих станций метеорологической сети в районе ответственности за ГМО; N — общее количество станций метеорологической сети в районе ответственности за ГМО;  $g = {}^{N}/_{S}$  — фактическая плотность станций метеорологической сети в районе ответственности за ГМО; S — площадь района ответственности за ГМО.

Время, отведенное для производства метеорологических наблюдений, характеризуется величиной  $\tau$ , установленной директивно.

Тогда выражение (5) может быть представлено в следующем виде:

$$P(\widehat{AT}/\widehat{H}_{ATi}) = P[(\widehat{v} \ge \widehat{z}_1) \cap (\widehat{g}_{\widehat{\sigma}} \le \widehat{z}_2) \cap (\widehat{\tau} \le \widehat{z}_3)]. \tag{8}$$

Поскольку требования к оперативности  $\hat{\tau}$  метеорологических наблюдений заданы директивно и заведомо удовлетворяются, значит, цель достижения производства метеорологических наблюдений по данному аспекту является достоверным событием. В соответствии с положениями ТЭЦП такой операнд в выражении (8) может быть поглощен показателями  $\hat{g}_{\partial}$  и  $\hat{v}$ . В результате данной операции выражение (8) примет вид:

$$P(\widehat{AT}/\widehat{H}_{ATi}) = P[(\widehat{v}' \ge \widehat{z}_1') \cap (\widehat{g}' \le \widehat{z}_2')], \tag{9}$$

$$\hat{v}' = v_{\partial}(\hat{z}_3'); 
\hat{g}' = g(\hat{z}_3')$$
(10)

– операционный функционал [1].

Соотношения (9) и (10) означают, что результативность  $\hat{v}'$  и расход ресурсов  $\hat{g}'$  обусловлены продолжительностью наблюдений ( $\hat{z}_3'$ ). Поэтому для достижения цели подсистемы метеорологических наблюдений необходимо и достаточно, чтобы расход ресурсов не превзошел допустимого ( $\hat{z}_2'$  и  $\hat{z}_3'$  соответственно).

Конкретный вид операционного функционала (10) определяется эмпирически для конкретного значения показателя  $z_3$ .

Для вычисления вероятности  $P(\widehat{^{AT}}/\widehat{H}_{ATi})$  необходимо определить вид закона

совместного распределения результативности и ресурсоемкости операции. При этом выражение (9) примет следующий вид:

$$P(\widehat{AT}/\widehat{H}_{ATi}) = \iint_{-\infty}^{\infty} \Phi_{\hat{Y}'_{<2>}/M}(z_1, z_2) dF_{\hat{Z}'_{<2>}}(z_1, z_2), \tag{11}$$

где  $\Phi_{\hat{Y}'_{<2>}/H}(z_1,z_2)$  — условная вероятность достижения цели метеорологических наблюдений при условии  $(\hat{z}'_1=z_1)\cap(\hat{z}'_2=z_2), M\simeq(\hat{\tau}=\hat{z}_3), \hat{Y}'_{<2>}=<\hat{z}'_1,\hat{z}'_2>.$ 

Вид закона совместного распределения  $\Phi_{\hat{Y}'_{<2>}/M}(y_1,y_2)$  может быть определен по эмпирически установленному закону распределения  $\hat{v}$  и выражениям (10) с помощью аппарата теории вероятностей [9], математической статистики [10] и ТЭЦП [8].

После определения вероятностей правильной диагностики состояния атмосферы каждой из подсистем наблюдений осуществляется расчет вероятностей  $P(\widehat{AT}/\widehat{H}_{ATk})$ . Затем по формуле (3) производится вычисление вероятности  $P(\widehat{AT})$ .

Аналогично производится вычисление вероятностей правильной диагностики состояния других геосфер с помощью комбинаций соответствующих подсистем наблюдений. Использованная процедура позволяет определить оптимальный состав подсистемы гидрометеорологических наблюдений в целом, исходя из особенностей решаемых потребителем ГМИ задач и с учетом особенностей рельефа местности освещаемого географического района.

Технология вычисления вероятности (9)-(11) может быть использована при нахождении вероятностей  $P(\hat{C}), P(\widehat{D})$ , определяющих степень достижения целей функционирования остальными подсистемами ССГМО.

#### Выводы

Обеспечение требуемого качества гидрометеорологической информации в любых условиях обстановки является основной целью как существующих, так и проектируемых систем гидрометеорологического обеспечения. Однако в настоящее время отсутствует единая методология в области обоснования требований к результатам функционирования систем гидрометеорологического обеспечения.

В статье рассмотрен вариант математической модели специализированной системы гидрометеорологического обеспечения, позволяющий определять эффективность проводимого ею гидрометеорологического обеспечения потребителя с учетом особенностей решаемых им задач.

Используя модель (1)-(11), заинтересованное лицо может оценить эффективность функционирования уже существующих систем, а также сформировать облик новой системы, обеспечивающей эффективность гидрометеорологического обеспечения потребителя не ниже требуемого значения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Дроздов О. А. Метод построения сети метеорологических станций в равнинной местности // Тр. ГГО. 1936. Вып. 12. С. 10–12.
- 2. Рубинштейн Е. С. Принципы построения сети метеорологических станций // Тр. ГГО.– 1936. Вып. 12. С. 3–9.
- Монокрович Э. И. Об экономической эффективности метеорологического обеспечения авиации // Метеорология и гидрология. – 1979. – № 9. – С. 56–60.
- 4. Каган Р. Л., Хлебникова Е. И. О влиянии густоты сети станций на характеристики изменчивости интерполированных значений // Метеорология и гидрология. 1981. № 5. С. 39—47.
- 5. Покровский О.М. Анализ эффективности методов оптимизации наземных наблюдательных сетей // Тр. ГГО. 1989. Вып. 528. С. 82–88.
- 6. Покровский О. М. О рационализации региональных наблюдательных сетей // Метеорология и гидрология. 2000. № 8. С. 5–21.
- 7. Альшанский Я. Ю., Вимберг Г. П., Кондратюк В. И. Вопросы оценивания эффективности гидрометеорологической информации и основы ценообразования в гидрометеорологии. Современные исследования Главной геофизической обсерватории. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. Т. 1. С. 300–320.
- 8. Петухов Г. Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Часть 1. М.: МО, 1989. 660 с.
- 9. Иоффе А. Я., Марков В. М., Петухов Г. Б. и др. Вероятностные методы в прикладной кибернетике. Л.: ВИКИ имени А.Ф. Можайского, 1978. 424 с.
- 10. Городецкий В. И., Иоффе А. Я., Морозов Л. М. и др. Статистические методы в прикладной кибернетике. М.: МО, 1980.-377 с.

## PROBABILISTIC MODEL OF SPECIAL-PURPOSE SYSTEM OF HYDROMETEOROLOGIC SUPPORT

### A. A. Borisov, Y. V. Kuleshov, A. B. Makov (Mozhaisky Military Space Academy)

The mathematical model of performance indicator of operation for the special purpose hydrometeorological support systems has been developed. The model takes its structure composition and functions into account.

УДК 620.1.08:551.5:355

### МЕТОД СЖАТЫХ ИЗМЕРЕНИЙ – НА СЛУЖБУ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЕННО-МОРСКОГО ФЛОТА

Ю. Н. ЖУКОВ (АО «ГНИНГИ)

Приводится краткое описание нового метода сжатых измерений на примере применения его к измерениям гидрометеорологических процессов. Метод позволяет подробно описать изменчивость гидрометеорологических процессов при небольшом числе измерений в случайных пространственновременных точках.

Тема статьи возникла почти случайным образом в одной из дискуссий автора с сотрудником 2-го управления ГНИНГИ В. С. Анохиным в конце 2016 года. Оппонент высказал мнение, что дискретизация измерений гидрометеорологических процессов

должна определяться теорией Шеннона. Такое утверждение В. С. Анохина удивило автора своей безальтернативностью. В 2015 году исполнилось 100 лет, как Э. Т. Уиттекер впервые сформулировал закономерность, которая позже вошла в историю науки как теорема отсчетов Уиттекера-Котельникова-Шеннона (УКШ) [1, 2]. Действительно, в отечественной гидрометеорологии до настоящего времени она является единственной теоретической основой, определяющей проведение измерений. Но неужели математики за сто последних лет не открыли новых методов дискретизации измерений? Автор проделал непродолжительный поиск и обнаружил, что в начале XXI века математиками действительно открыт новый метод дискретизации измерений – метод сжатых измерений (compressive sensing) [3]. В статье термин sompressive sensing передается словами «сжатые измерения» в соответствии с книгой [4], написанной одним из авторов метода.

Метод сжатых измерений уже широко применяется в практике, например, в космических системах фотографии, астрономии, томографии, сейсмике, радиосвязи, беспроводных сенсорных сетях (wireless sensor network) и т. д. В зарубежной гидрометеорологии он сейчас применяется в обработке данных метеолокаторов [5]. На тему сжатых измерений в зарубежной литературе уже опубликованы десятки книг, сотни патентов, тысячи статей и миллионы строк программного кода [6]. В отечественной литературе автор обнаружил всего одну статью [7], требующую определенных навыков в чтении математической литературы. Автор полагает, что такое положение дел сдерживает развитие гидрометеорологического обеспечения (ГМО) ВМФ, и следует в доступной форме изложить метод сжатых измерений для скорейшего внедрения в практику ГМО. Указанные соображения привели к написанию данной статьи.

Актуальность статьи определяется не только новизной рассматриваемого метода, но и практической значимостью проблемы дискретизации измерений гидрометеорологических процессов. Действительно, дискретизация сигналов и измерение процессов практически любой природы лежат в основе информационной обработки данных. Оптимизация выбора дискретизации измерений является одной из ключевых задач на пути цифровой обработки наблюденных данных для получения надежной достоверной информации о состоянии наблюдаемых процессов. Несоблюдение теоретических требований к дискретизации измерений приводит либо к неадекватным данным, либо к необоснованному введению информационной избыточности и завышению ресурсных затрат на проведение измерений.

В связи с этим автор полагает, что внедрение метода сжатых измерений, позволит существенно повысить информационную и экономическую эффективность  $\Gamma$ МО BМ $\Phi$ .

Теорема отсчетов УКШ имеет целью математическую интерполяцию: нахождение непрерывных промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений. Об этом свидетельствует само название статьи Уиттекера [1]. Теорема отсчетов УКШ определяет величину постоянного интервала между измерениями некоторого сигнала. Величина интервала определяет необходимое число n измерений и гарантирует, что последующая их интерполяция не исказит форму сигнала. В отличие от этого в методе сжатых измерений целью является математический способ восстановления (reconstruction, recovery) некоторого числа p неизвестных эквидистантных дискретных значений сигнала по m проведенным изме-

рениям данного сигнала. Причем число m значительно (на порядок) меньше p . Здесь n , m и p — натуральные числа.

Возможность использования малого числа измерений для восстановления намного большего количества значений сигнала дает основание автору с уверенностью говорить о практическую значимости метода сжатых измерений для ГМО ВМФ. Значимость здесь имеет два аспекта. Первый состоит в том, что по меньшему числу измерений можно получить значения в большом числе других точек, второй — в том, что на основе уже проведенных ранее эквидистантных измерений (по теореме отсчетов УКШ, если положить p=n) возможно восстановить значения сигнала с меньшей дискретностью, т. е. повысить разрешение («резкость») уже проведенных измерений.

Цель статьи заключается в том, чтобы ознакомить читателя с основными положениями метода сжатых измерений, привести основные этапы его применения и дать вычислительные примеры, иллюстрирующие его эффективность в сравнении с применением теоремы отсчетов УКШ в гидрометеорологических измерениях.

Общая задача дискретизации измерений. Далее в статье все исследуемые в гидрометеорологии процессы интерпретируются как непрерывные пространственновременные функции f. Для определенности можно рассматривать f как временной процесс. Физические и технические условия измерений процессов обусловливают необходимость дискретности измерений f. Общая задача измерений состоит из двух связанных между собою задач: прямой и обратной. Прямая задача — это процедура  $\Phi$  определения координат точек (моментов) измерения сигнала и проведения измерений в них. Обратная задача — процедура  $\Phi^{-1}$  восстановления f по выполненным дискретным измерениям. Здесь под  $\Phi$  понимается некий математический линейный оператор.

Решение методом теоремы отсчетов УКШ. Теорема в современной формулировке гласит: если непрерывная функция f не содержит частот выше  $\omega_{\max}$ , то она полностью определяется (интерполируется) своими мгновенными значениями, взятыми с частотой, более удвоенной  $\omega_{\max}$  [2]. Обозначим оператор измерения, соответствующий теореме отсчетов УКШ, через  $\Phi_S$ , тогда прямая задача планирования измерений запишется в виде:

$$\{y\}_n = \Phi_S f \,, \tag{1}$$

где  $\{y\}_n - n$  дискретных измерений f , а обратная задача:

$$f = \Phi_S^{-1} \{ y \}_n \,. \tag{2}$$

Для теоремы отсчетов УКШ прямая задача проектирования оператора  $\Phi_S$  сводится к априорному определению  $\omega_{\max}$ , заданию постоянного интервала измерений  $\Delta t \leq 1/2\omega_{\max}$ . Если положить, что все пространство измерений нормировано, т. е.

равно единице, то требуемое число измерений равно  $n=1/\Delta t$ . Моменты наблюдений соответствуют серединам равных интервалов длиной  $\Delta t$ . Если эти интервалы про-индексировать в порядке возрастания координаты, то  $\Phi_S$  будет представлять собой единичную квадратную диагональную матрицу выбора моментов измерения.

Оператор решения обратной задачи  $\Phi_S^{-1}$  определяется выбором некоторого метода интерполяции между смежными значениями  $\{y\}_n$ . Например, в метеорологии в большинстве случаев смежные значения измерений линейно интерполируют в промежутке между ними.

Очевидно, что оператор  $\Phi_S$  в теореме отсчетов УКШ связывает дискретное и непрерывное физическое представление сигнала f. Поэтому прямая (1) и обратная (2) задачи измерений в теореме отсчетов УКШ решаются в физическом пространстве сигнала.

В XX веке оператор  $\Phi$  проектировался только на основе теоремы отсчетов УКШ. В XXI веке ему на смену пришел метод сжатых измерений, который позволяет проектировать  $\Phi$  более эффективно. Это обусловлено более сложным математическим представлением f, чем это принято в теореме отсчетов УКШ.

Решение методом сжатых измерений. В методе сжатых измерений оператор  $\Phi$  связывает дискретное физическое представление сигнала  $\{f\}_p$  с дискретным абстрактным представлением сигнала f в многомерном пространстве некоторых базисных векторов  $\{x\}_p$ :

$$\{f\}_{n} = \Psi\{x\}_{n}. \tag{3}$$

Здесь p — относительно большое число (теоретически бесконечное),  $\Psi$  — соответствующее отображение (преобразование) функции f в базисное пространство  $\{x\}_p$ . Например, если в качестве базисных векторов  $\{x\}_p$  выбрать синусы и косинусы, то  $\Psi$  будет преобразованием Фурье, а если в качестве  $\{x\}_p$  взять пространство вейвлетов, то  $\Psi$  является вейвлет-преобразованием. Преобразование Фурье и вейвлет-преобразование широко применяются в метеорологии при анализе изменчивости гидрометеорологических процессов. Кроме этих двух преобразований, на практике применяются и другие аналогичные, например, дискретное косинусное преобразование, курвлет-преобразование, шиарлет-преобразование, атомарные функции Рвачева и т. д.

Для метода сжимающих измерений прямая задача измерений с учетом выражения (3) записывается в виде:

$$\{y\}_m = \Phi_T \Psi\{x\}_p \,, \tag{4}$$

где  $\{y\}_m$  — измеренные значения f ,  $\Phi_T$  — оператор, соответствующий методу сжатых измерений. Обозначим произведение операторов  $\Phi_T\Psi$  через A , тогда (4) можно записать в виде:

$$\{y\}_m = A\{x\}_p. \tag{5}$$

Теперь можно сформулировать задачу восстановления f на основе сжатых измерений: требуется по измеренным дискретным данным  $\{y\}_m$  вычислить  $\{x\}_p$ , пользуясь выражением (5), а затем вычислить  $\{f\}_p$ , применяя (3).

Следует обратить внимание на то, в методе сжатых измерений задача интерполяции измерений не рассматривается.

Поиск решения уравнения (5) проводится в виде решения задачи линейного программирования для минимизации суммы абсолютных значений  $\{x\}_n$ :

$$\sum_{p} ||x|| \to \min \text{ при условии, что } \{y\}_{m} = A\{x\}_{p}.$$
 (6)

Для такой задачи существует множество эффективных решений. Решение задачи (3) – тривиально.

Эффективное применение сжатых измерений на практике возможно только при выполнении требований к  $\{y\}_m$  и  $\{x\}_p$ .

Требования  $\{y\}_m$ . Дискретные измерения  $\{y\}_m$  должны проводиться только в случайные моменты времени. Рандомизация измерений — это ключ к применению метода сжатых измерений. Методы вычисления рандомизированных моментов измерения разработаны и описаны в литературе, например, в работе [6]. Это требование на практике достаточно просто выполнимо.

Требования  $\kappa$   $\{x\}_p$ . Базисное пространство  $\{x\}_p$  должно иметь высокую размерность с  $p \ge 10^3$ . Функция f должна быть сжимаемой в базисном пространстве векторов  $\{x\}_p$ , то есть функция f должна представляться разряженным вектором коэффициентов в базисном пространстве векторов  $\{x\}_p$ . Это значит, что только небольшое число коэффициентов разложения  $\Psi$  (например, коэффициентов фурьеразложения) должны иметь большие значения, все остальные должны быть малы. Чем меньше отношение числа коэффициентов с большими значениями к числу коэффициентов с малыми значениями, тем меньшее число измерений  $\{y\}_m$  необходимо для восстановления f.

Для гидрометеорологических процессов требования к  $\{x\}_p$  выполнены всегда. Действительно, при анализе гидрометеорологических процессов широко применяются методы сжатия информации, например, метод разложения по естественным ортогональным составляющим или метод главных компонент (principal component

analysis), вейвлет-разложения. Если сжатие информации возможно, то это свидетельствует о том, что в подавляющем большинстве своем коэффициенты разложения малы или равны нулю, что и требуется для применения метода сжатых измерений.

Таким образом, гидрометеорологические процессы удовлетворяют всем необходимым требованиями для применения метода сжатых измерений. Рассмотрим теперь, как обстоит дело с применимостью теоремы отсчетов УКШ к гидрометеорологическим процессам.

Применимость указанной теоремы связана с условием наличия в изменчивости измеряемого процесса максимальной частоты  $\omega_{\max}$ . В то же время в открытых системах типа атмосферы и океана изменчивость присутствует во всех пространственно-временных масштабах (явление перемежаемости [8]), поэтому для процессов в таких системах не существует максимальной частоты  $\omega_{\max}$ . В подавляющем большинстве случаев в гидрометеорологии измерения проводятся через равные интервалы времени (пространства – времени)  $\Delta t$ . В соответствии с теоремой отсчетов УКШ для таких измерений можно определить верхнюю частоту, которую теоретически можно восстановить по таким измерениям. Очевидно, что она равна  $\omega_{\max} = 1/2\Delta t$ . В соответствии с теоремой отсчетов УКШ при измерениях с интервалами  $\Delta t$  изменчивость выше частоты  $\omega_{\max}$  восстановить невозможно. На практике восстановление измерений приводит к известному явлению маскировки (или подмены частот, или алиасингу) колебаний с частотой выше  $\omega_{\max}$  [9]. Все содержащиеся в измеряемом процессе частоты выше частоты  $\omega_{\max}$  при восстановлении будут свернуты в диапазон частот  $[0-\omega_{\max}]$  и будут неотличимы от более низких частот этого диапазона (рис. 1).

Таким образом, из отсутствия  $\omega_{\max}$  для гидрометеорологических процессов f и из теоремы отсчетов УКШ следует, что для эффективного восстановления f требуются уменьшать интервал дискретности  $\Delta t$ , увеличивая число измерений n. При таких условиях восстановление гидрометеорологического процесса остается недостижимой целью, вследствие искажений за счет алиасинга.

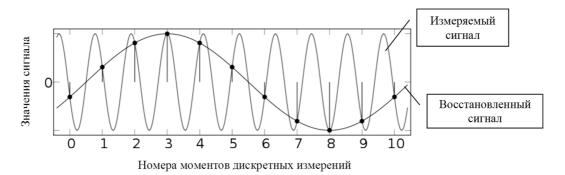


Рис. 1. Алиасинг при восстановлении (синяя кривая) измеряемого сигнала (красная линия) по дискретным измерениям (черные точки) при интервале дискретности большем, чем половина периода сигнала.

Примечание. Цветные иллюстрации к статье приведены на сайте журнала.

Приведем примеры количественной оценки эффективности применения теоремы отсчетов УКШ и метода сжатых измерений для проведения измерений гидрометеорологических процессов с использованием функции

$$f(t) = \sin(2\pi 701t) + 0.5\sin(2\pi 1637t) \tag{7}$$

в качестве модельной функции для гидрометеорологических процессов. Выбор этой функции обусловлен следующими ее свойствами. Непосредственно из выражения (7) видно, что эта функция непрерывная и имеет все производные, но не периодическая, так как частоты синусов несоизмеримы (числа 701 и 1637 — простые числа). Такие функции в математике называются почти-периодическими.

Дискретные значения функция (7) могут служить числовой моделью непрерывного гидрометеорологического процесса без верхней частоты  $\omega_{\rm max}$ . Действительно, график функции (7) выглядит гладким для интервалов дискретизации  $\Delta t \geq 10^{-5}$  (рис. 2a). Если положить величину дискретности  $\Delta t \geq 10^{-5}$ , то восстановление функции (7) линейной интерполяцией всегда возможно с достаточной точностью. Для значений  $\Delta t < 10^{-5}$  график функции (7) имеет хаотичный вид случайной функции (рис.  $2\delta$ ). Другими словами, вычисления функции (7) с шагом, равным  $\Delta t$ , лежащим в интервале  $0 < \Delta t < 10^{-5}$ , приводит к числовой функции, для которой нет  $\omega_{\rm max}$ , так же, как и у гидрометеорологических процессов.

Оценим эффективность применения теоремы отсчетов УКШ для функции (7), представленной  $\Delta t = 10^{-3}$  (обозначим ее символом F ). Графическое представление F дано на рис.  $2\delta$ . Положим, что F представляет реальный гидрометеорологический процесс, который восстанавливается с помощью дискретных измерений, полученных на основе теоремы отсчетов УКШ, т. е. с помощью регулярных измерений. Будем считать, что функции (7) и F неизвестны измеряющему (как в реальной жизни).

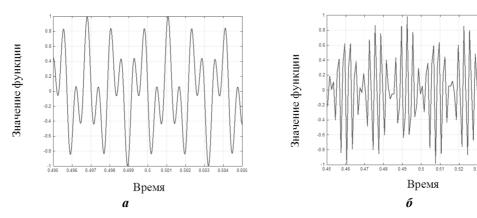
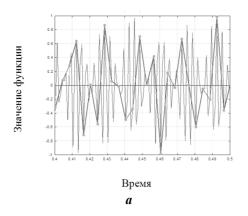


Рис. 2. Графики функции (7), вычисленной на единичном интервале с различными интервалами дискретизации. На графиках представлены центральные участки:

$$a$$
 – для  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-6}$ ;  $\delta$  – для  $\Delta t = 10^{-3}$ . См. примечание к рис. 1.

Степень эффективности измерений для восстановления F определим следующим образом. Будем имитировать измерения функции F с различными шагами дискретизации  $\Delta t = 10^{-3}, 2 \cdot 10^{-3}, ..., 20 \cdot 10^{-3}$  путем прореживания множества значений функции F с шагом k = 0,1,...,20. Обозначим получаемые таким образом множество значений функции F через  $\{j\}_m^k$ . Здесь символом m обозначено общее число измерений для данного k. Так как общее число значений F равно 1000, то очевидно, что m = 1000/(k+1). По каждому множеству измерений  $\{j\}_m^k$  восстановим F традиционным способом интерполяции для гидрометеорологии — линейной интерполяцией смежных точек (рис. 3a) и обозначим восстановленную таким образом F символом  $F_m^k$ .



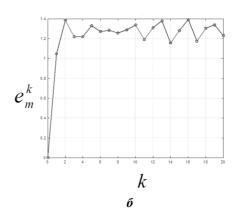


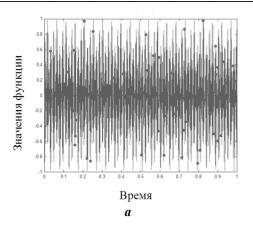
Рис. 3. Численная оценка эффективности восстановления функции (7) по регулярным измерениям функции F с различной дискретностью: a – пример графика линейной интерполяции функции F при k=4;  $\delta$  – график значений  $e^k_m$  для k=0,1,...,20. См. примечание к рис. 1.

Оценку эффективности восстановления определим в виде  $e_m^k = std(F - F_m^k)/std(F)$  — отношения среднеквадратической разности  $std(F - F_m^k)$ , измеряемой функции F и ее восстановления  $F_m^k$  к среднеквадратическому отклонению измеряемой функции std(F). Результат вычисления значений  $e_m^k$  представлен на рис.  $3\delta$ . Результаты вычислений показали, что только при измерении каждого значения F функция восстанавливается с нулевой погрешностью, для всех других интервалов дискретности ошибка восстановления больше std(F) (рис. sd(F)). Таким образом, для измерения гидрометеорологических процессов теория отсчетов УКШ приводит к удручающему показателю эффективности.

Теперь перейдем к оценке эффективности применения метода сжатых измерений для функции F . Предварительно приведём общую последовательность этапов организации  $\{y\}_m$  измерений и численного восстановления  $\{f\}_p$  методом сжатых измерений.

- 1. Этап определения преобразования  $\Psi$ . По архивам наблюдений определяют вид наиболее предпочтительного преобразования  $\Psi$  и необходимую размерность p базового пространства  $\{x\}_p$ . Обычно выбирают  $p \ge 10^3$ . Задается временной интервал T, который разбивается на p равных отрезков  $\{\Delta t_i\}$ . Полученное множество интервалов индексируется последовательно в порядке возрастания координаты i=1,2,...,p. Преобразование  $\Psi$  считается предпочтительным, если оно является более сжимающим для функции f.
- 2. Этап определения множества случайных моментов измерения  $\{i_j\}_m$ . Задается требуемое число измерений m < p и определяется множество  $\{i_j\}_m$ , представляющее собой m случайно выбранных номеров интервалов  $\{\Delta t_i\}$ , в которых будут проводиться измерения. Задание  $\{i_j\}_m$  выполняется выбором m первых значений из случайной перестановки первых n натуральных чисел.
- 4. Этап измерений. Измерения выполняют в середине интервалов  $\{\Delta t_i\}$  с номерами  $\{i_j\}_m$ . В результате измерения получаем множество значений  $\{y_j\}_m$ .
- 5. Этап восстановления  $\{f\}_p$ . Вычисляется матрица  $A = \Phi_T \Psi^{-1}$ . Здесь  $\Phi_T$  прямоугольная матрица размером  $m \times p$ . Строки матрицы соответствуют порядковому номеру измерения j (j=1,2,...,m), столбцы матрицы порядковому номеру i (i=1,2,...,p) базисных функций  $\{x\}_p$ . В строках матрицы  $\Phi_T$  с индексами  $\{i_j\}_m$  и столбцах с соответствующими индексами j=1,2,...,m записаны единицы, а в остальных нули. Вычисляют матрицу A путем применения к  $\Phi_T$  преобразования  $\Psi^{-1}$  (обратного к  $\Psi$ ). Используя измерения  $\{y_j\}_m$  и матрицу A вычисляют вектор  $\{x\}_p$ , решая уравнение (5) методом линейного программирования. И, наконец, восстанавливают значения  $\{f\}_p$ , применяя прямое преобразование  $\Psi$  к вектору  $\{x\}_p$ .

Применим метод сжатых измерений для проектирования измерений и восстановления функции F (рис. 26). Напомним, что функции (7) и F неизвестны измеряющему. В качестве оператора  $\Psi$  использовалось дискретное косинусное преобразование с размерность базисного пространства p=1000. Вычисления выполнялись для следующего набора числа измерений: m=50,100,...,1000. Измерения имитировались выбором значений функции F в случайные моменты  $\left\{i_j\right\}_m$  (рис. 4). Вычисления проводились с использованием программного пакета SparseLab [10]. На рис. 4, 5 приведены иллюстрации к выполненным вычислениям.



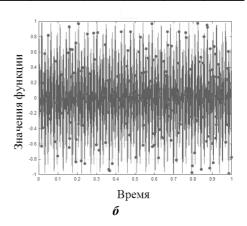
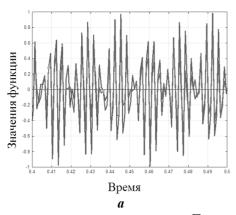


Рис. 4. Пример рандомизации моментов измерений: a – график функции F и точки измеренных значений m=50;  $\mathfrak{d}$  – представлен график функции F и точки измеренных значений m=200. См. примечание к рис. 1



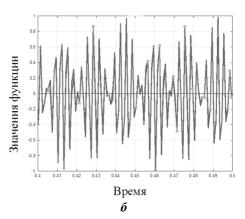


Рис. 5. Пример восстановления F по выполненным измерениям: a – график (центральная часть) восстановленной функции  $F_m$  при m=50 измеренных значений, приведенных на рис. 4a:  $\delta$  – график (центральная часть) восстановленной функции  $F_m$  при m=200 измеренных значений, приведенных на рис.  $4\delta$ . На графиках синим цветом дана функция F, а красным цветом ее восстановление  $F_m$ . См. примечание к рис. 1

Степень эффективности метода сжатых измерений для восстановления F определим аналогично оценке эффективности теоремы отсчетов УКШ. Обозначим восстановленное значение F, выполненное по m измеренным точкам, через  $F_m$ . Рассчитаем значение  $e_m = std(F-F_m)/std(F)$  — отношение среднеквадратической разности  $std(F-F_m)$ , т. е. измеряемой функции F и ее восстановленной  $F_m$ , к среднеквадратическому отклонению измеряемой функции std(F). Результат вычислений значений  $e_m$  представлен на рис. 6. Для сравнения с эффективностью восстановления F по теореме отсчетов УКШ на том же рисунке представлен график  $e_m^k$ ,

приведенный на рис. 36, но не в координатах числа точек дискретности k, а в координатах общего числа измерений m.

Результаты вычислений указывают, что при всех  $m = 50,\!100,\!...,\!1000$  ошибка  $e_m < 0,\!5$  и  $e_m$  меньше  $e_m^k$  в два раза и более. Число же измерений требуемых для восстановления F в методе сжатых измерений, на порядок меньше, чем при использовании теоремы отсчетов УКШ (рис. 6). Достаточно пятидесяти измерений, чтобы восстановить F. Метод сжатых измерений дает прекрасный результат при восстановлении измеряемого процесса и показывает великолепную эффективность в сравнении с применением теоремы отсчетов УКШ.

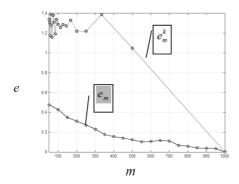


Рис. 6. Графики оценки эффективности метода сжатых измерений  $e_m$  и теоремы отсчетов УКШ  $e_m^k$  для восстановления F

Приведенные результаты вычислений и сравнительная оценка эффективности методов свидетельствуют, что метод сжатых измерений всегда эффективнее традиционного, основанного на теореме отсчетов УКШ, причем эффективнее во много раз. Преимущество метода сжатых измерений проявляется в двух аспектах: информационном и экономическом. Информационный аспект состоит в том, что сжатые измерения позволяют восстановить измеряемый процесс с большей детализацией, используя значительно меньшее число дискретных измерений, а экономический — в том, что для метода сжатых измерений необходимое число измерений мало, а, следовательно, и экономические затраты на их проведение меньше. Это говорит в пользу того, что метод сжатых измерений целесообразно внедрить в практику ГМО ВМФ как с информационной, так и с экономической точек зрения.

Перспективы применения метода сжатых измерений в ГМО ВМФ огромны. В гидрографии этот метод может использоваться при конструировании многолучевых эхолотов, при восстановлении форм поверхности морского дна по данным о глубинах, при навигации по рельефу дна. В гидрометеорологической практике метод может применяться при создании беспроводных сенсорных сетей для оперативного мониторинга гидрометеорологических элементов на акваториях морей, при планировании и проведении измерений гидрометеорологических процессов, а также в методах камеральной обработки результатов измерений для фильтрации шумов и ошибок. Метод сжатых измерений можно использовать для повышения разрешения измерений, хранящихся в базах гидрометеорологических данных, полученных с применени-

ем теоремы отсчетов УКШ. Особую значимость этот метод имеет в акустической томографии океана.

Эффективность метода сжатых измерений полностью основана на «непостижимой эффективности математики в естественных науках» [11].

В заключение автор выражает признательность В. С. Анохину за невольное побуждение автора к написанию этой статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Wittaker E. T. On the function which are represented by the expansion of interpolating theory // Proc. Roy. Soc. Edinburgh. 1915. Vol. 35. P. 181–194.
- 2. Алексеев А.В. Современная теория дискретного представления непрерывных процессов в задачах моделирования // Третья международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» «ИКМ МТМТС 2015»/ Санкт-Петербург, 1 июля 2015 г. СПб, 2015. С. 16–25.
- 3. Candes, E., Romberg, J., Tao, T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information // IEEE Trans. Inform. Theory. 2006. Vol. 52. P. 489–509.
- 4. Тао Т. Структура и случайность. М.: МЦНМО, 2013. 360 с.
- 5. Mishra, Kumar Vijay. Compressed sensing applied to weather radar. PhD (Doctor of Philosophy) thesis. University of Iowa, 2015. 111 p. URL: http://ir.uiowa.edu/etd/1885
- 6. Сайт Университета Райса. https://datascience.rice.edu
- 7. Граничин О.Н. Рандомизация измерений и  $l_1$ -оптимизация // Стохастическая оптимизация в информатике. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2009. Вып 5. С. 3–23.
- 8. Жуков Ю.Н. Перемежаемость в гидрометеорологии и ее роль для гидрометеорологического обеспечения Военно-Морского Флота // Навигация и гидрография. 2016. № 45. С. 51–59.
- 9. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
- 10. Сайт Стэнфордского университета. http://sparselab.stanford.edu
- 11. Вигнер Е. Непостижимая эффективность математики в естественных науках // Этюды о симметрии. М.: Мир, 1971. C. 182-198.

### METHOD OF COMPRESSED MEASUREMENTS TO PROVIDE THE HYDROMETEOROLOGIC SUPPORT FOR THE NAVY

#### Y. N. Zhukov («GNINGI» JSC)

The short description of the new method, the method of compressive sensing, using the measurement of hydrometeorologic processes as an example, is presented. The method allows to describe the changeability of hydrometeorologic processes in random samples.

УДК.621.391.8:551.576

### ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРИЕМА ЭХОСИГНАЛА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ

А. В. ДЁМИН, Е. А. СЕЛЁДКИНА, (АО «ЛОМО»; НИУ ИТМО)

В статье рассмотрен процесс определения высоты нижней границы облаков (ВНГО) и проанализированы существующие способы решения уравнения лазерного зондирования. Предложен новый метод обработки эхосигналов, который существенно сокращает необходимое количество импульсов, испускаемых лазерным измерителем, и тем самым упрощает получение выходных данных, что важно в практической деятельности, особенно в сложных метеорологических условиях при выпадении осадков.

Высота нижней границы облаков — важнейшая характеристика, определяющая степень сложности погоды. Поэтому точное измерение высоты нижней границы облаков (ВНГО) является значимым вопросом для обеспечения безопасности полётов морской авиации, особенно, в сложных метеорологических условиях.

В настоящее время для измерения ВНГО применяются импульсные лазерные измерители, блок-схема такого измерения представлена на рис. 1.

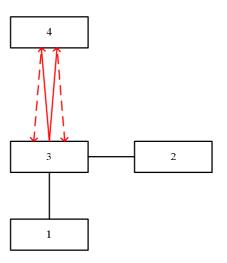


Рис. 1. Блок-схема лазерного измерителя ВНГО: 1– лазер; 2 – фотоприемное устройство с электроникой; 3 – оптическая система измерителя; 4 – облако

Процесс определения ВНГО заключается в измерении времени прохода короткого импульса лазера 1 и возвращении его в виде эхосигнала, отраженного от нижней границы облаков 4 на фотоприемное устройство 2, через оптическую систему 3. При посылке в атмосферу лазерного импульса мощность отраженного сигнала P(z), приходящего на фотоприемное устройство измерителя, необходимая для определения ВНГО, рассчитывается при помощи уравнения лазерного зондирования, которое имеет вид [1]:

$$S(z) = A_n b(z) \alpha_t(z) \exp\left[-2 \int_0^z \alpha_t(z) dz\right], \tag{1}$$

где  $S(z) = P(z)z^2$  – мощность эхосигнала;

z — высота;

 $A_n = \pi r_n^2 c P_0 c \tau_{_{\rm H}} / 2$  – аппаратурная постоянная;

c – скорость света;

 $P_0$  – мощность импульса лазера;

 $\tau_{_{\rm I\! I}}$  – длительность импульса лазера;

 $r_n$  — радиус входного зрачка оптической системы;

b(z) – коэффициент обратного рассеяния,

 $\alpha_t(z)$  – коэффициент ослабления.

В правой части уравнения (1) содержится два неизвестных параметра, b(z) -коэффициент обратного рассеяния,  $\alpha_t(z)$  – коэффициент ослабления, поэтому для его решения необходимо ввести дополнительные уточнения исходных данных, которые определяются при помощи следующих способов:

- 1) способ логарифмической производной;
- 2) способ наклонных трасс;
- 3) способ, предполагающий постоянство коэффициента обратного рассеяния b(z)=const по трассе локации (расстояние, проходимое сигналом);
  - 4) способ, основанный на аналитическом решении уравнения зондирования. Рассмотрим их.
- 1) В способе логарифмической производной предполагается, что в вертикальном направлении атмосферу можно разделить на несколько горизонтальных слоев, в каждом из которых  $b(z)={\rm const.}$  ( $z)={\rm const.}$  На практике данный способ применяется редко, так как невелика вероятность возникновения ситуаций, при которых сложатся данные условия.
- 2) В способе наклонных трасс осуществляют зондирование в двух наклонных направлениях, характеризующихся зенитными углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  ( $\theta_1 > \theta_2$ ). Отраженный сигнал при этом формируется различными объемами однородного слоя атмосферы, расположенного на высоте z. [3].
- 3) В способе, предполагающем постоянство коэффициента обратного рассеяния b(z)=const по трассе локации, её разбивают на ряд слоев толщиной  $\Delta_z$ . В данном способе оптические характеристики атмосферы являются постоянными.

4) В способе, основанном на аналитическом решении уравнения зондирования, диапазоны значений коэффициентов обратного рассеяния и ослабления атмосферы и облака принимают равными значениям, приведенным в таблице [2].

Коэффициенты обратного рассеяния и ослабления атмосферы

Атмосфера		Облака	
b(z), км <sup>-1</sup> ср <sup>-1</sup>	$\alpha_t(z)$ , km <sup>-1</sup>	b(z), км <sup>-1</sup> ср <sup>-1</sup>	$\alpha_t(z)$ , km <sup>-1</sup>
0,001-0,100	0,05-200	0,5-50	10–100

Для реализации способа, основанного на аналитическом решении уравнения лазерного зондирования, существуют два метода обработки данных эхосигналов. В первом осуществляется осреднение результатов измерений эхосигналов, во-втором происходит выбор из ряда измерений такого результата, который с заданной погрешностью совпадает с уровнем нижней границы облаков.

Одной из проблем обработки данных вышеприведенными методами является снижение точности и достоверности, получаемых на выходе результатов, в связи с одновременной обработкой эхосигналов  $\{(\mathbf{G}-\mathbf{C})_i\}_1^N$ , где  $(\mathbf{G}-\mathbf{C})_i$  – эхосигнал *i*-го сигнала, N – число принятых эхосигналов.

В связи с этим авторами статьи предложен новый метод, с помощью которого предполагается производить обработку совокупности пар принятых эхосигналов  $\left\{(\Im-C)_i u(\Im-C)_{i(j)}\right\}_{i=1}^M$ , последний из которых искусственно получен при помощи временной задержки  $\tau$ , где  $(\Im-C)_{i(\tau)}$  — эхосигнал i-го сигнала с временной задержкой, а M — число принятых пар эхосигналов.

Преимущества этого метода заключаются в следующем:

- в нём происходит обработка пар эхосигналов (один из которых отражен от облака, второй получен сдвигом его копии на величину задержки  $\tau$ ). В описанных же выше методах происходит обработка массива эхосигналов  $\{(\Im-C)_i\}_1^N$ , каждый  $(\Im-C)_i$  формально отличается от  $(\Im-C)_{i+1}$ , что усложняет обработку эхосигнала, как в плане необходимости увеличения числа N, так и в смысле точности определения ВНГО;
- повышена помехоустойчивость и надежность за счет избыточности сообщения и возможность подавления шумов от рассеянного излучения в каждой паре из  $\{(\Im-C)_i; (\Im-C)_{i(j)}\}_{i=1}^M$ , чем при приеме  $\{(\Im-C)_i\}_{i=1}^N$ .

Для обработки эхосигналов в предлагаемом методе используется принцип комплексирования, основа работы которого приведена в функциональной схеме приема, обработки эхосигналов и определения высоты нижней границы облака (рис. 2), где S – исследуемый сигнал;  $U_i$  – напряжение i-го сигнала;  $U_{i(\tau)}$  напряжение i-го сигнала с временной задержкой  $\tau$ ;  $M_i$  – совокупность числа измерений j-циклов по i сигна-

лов;  $U_{Mj}$  — напряжение обработанного сигнала;  $F_m$  — частота модуляции;  $K_{M_j}(\tau)$  — автокорреляционная функция сигнала; E — математическое ожидание.

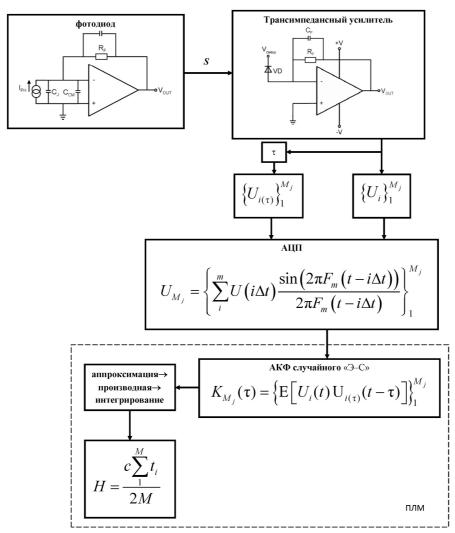


Рис. 2. Функциональная схема приема, обработки эхосигналов и определения высоты нижней границы облака. Объяснения в тексте

Функциональная схема приема и обработки эхосигнала работает следующим образом. Эхосигнал приходит на фотодиод, где преобразуется в электрический сигнал. Затем уже электрический сигнал попадает на увеличивающий его трансимпедансный усилитель (усилитель с обратной связью, основное преимущество которого заключается в отсутствии необходимости осуществлять какую-либо коррекцию; шумы усилителя намного меньше, чем у обычного усилителя напряжения). Усиленная пара электрических сигналов (сигнал, полученный сдвигом его копии на величину задержки т) поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который преобразует аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал). Затем цифровой сигнал поступает на программируемую логическую матрицу (ПЛМ). В ПЛМ програм-

мируется логическая часть для управления лазером, АЦП и буфером для измерения данных. В ПЛМ также программируется модель процессора для обработки измеренных данных и интерфейса связи с внешним компьютером.

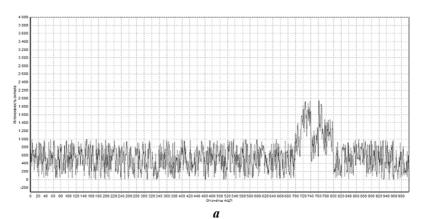
В соответствии с функциональной схемой (рис. 2) был разработан алгоритм для программного обеспечения, который используется в новом методе:

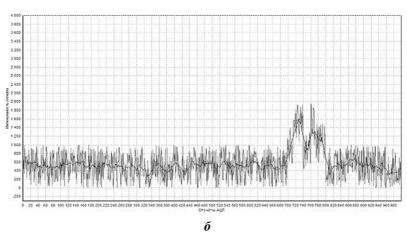
- 1. Очищается буфер данных.
- 2. Выполняется 1-ый цикла измерения, состоящего из *i*-импульсов лазера.
- 3. Запускается лазер.
- 4. Включается АЦП, каждая полученная  $\{(\mathbf{G} \mathbf{C})_i; (\mathbf{G} \mathbf{C})_{i(\tau)}\}_1^V$ , прибавляется к предыдущему.

Пункты 3 и 4 повторяют заданное число циклов M по i-импульсов лазеров в каждом, и на этом процесс измерения ВНГО заканчивается (достаточно  $M\approx 7$  циклов по  $I\approx 7$  импульсов).

5. Сохраняются результаты измерения.

На рис. З представлен результат моделирования приведённого метода измерения высоты нижней границы облаков, полученный авторами статьи.





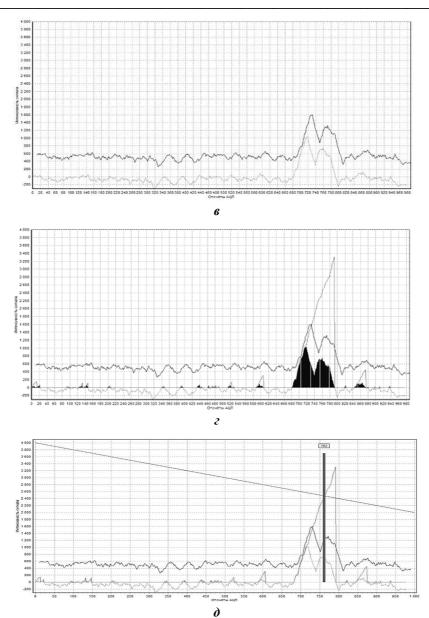


Рис. 3. Результат моделирования алгоритма измерения ВНГО. a – возможный вид принимаемого  $(\Theta-C)_i$ ;  $\delta$  – операция аппроксимации  $(\Theta-C)_i$ ;  $\epsilon$  – операция дифференцирования;  $\epsilon$  – операция интегрирования;  $\epsilon$  – операция сравнения текущего значения интеграла с пороговой кривой. Объяснения в тексте

При выполнении вышеописанной последовательности действий в буфере обмена накапливаются результаты измеренных значений эхосигналов, которые следует обработать.

Вид принятого эхосигнала представлен на рис. 3а.

Для обработки принятого эхосигнала изначально процессору необходимо выполнить операцию аппроксимации эхосигнала, т.е. провести процедуру сглаживания

измеренных данных (рис. 36). Затем происходит операция дифференцирования (выполняется вычисление производной сигнала), которая представлена на рис. 36.

Выполняется операция интегрирования, процессор вычисляет интеграл на участках, где производная больше нуля. Зоны подсчета интеграла показаны темным закрашиванием (рис. 32).

Процессор при подсчете интеграла, сравнивает текущее значение интеграла с пороговой кривой, данный отчет принимается как результат измерения, показан на рис.  $3\partial$  в виде столбца.

На рис. 4 приведен график сравнения измеренных значений ВНГО с эталонным значением. В качестве эталона используется лазерный измеритель ВНГО Vaisala CL31.

На данном рисунке видно, что ошибка измеренной высоты не превышает 10 %. Значение высоты, измеренное нашим методом z=935 м, измеренное лазерным измерителем ВНГО Vaisala CL31 z=944 м.

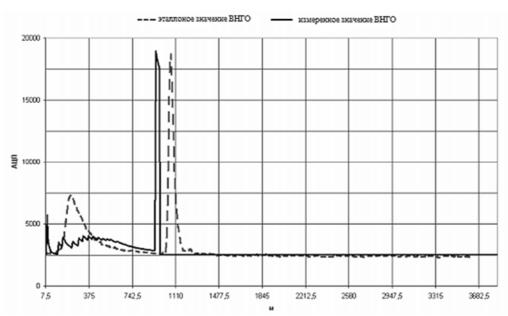


Рис. 4. График сравнения измеренных значений ВНГО с эталонным значением. Объяснения в тексте

#### Выводы

- 1. В статье рассмотрен процесс определения высоты нижней границы облаков и проанализированы существующие способы решения уравнения лазерного зондирования.
- 2. Предложен новый метод обработки эхосигналов, который существенно сокращает необходимое количество импульсов, испускаемых лазерным измерителем, тем самым:
  - снижается трудоемкость при осуществлении измерений;
- упрощается получение выходных данных, что важно в практической деятельности, особенно, в сложных метеорологических условиях при выпадении осадков.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Орлов В. М. Сигналы и помехи в лазерной локации / Под ред. В. Е. Зуева. М.: Радио и связь, 1985.-264 с.
- 2. Волков О.А. Светолокационный измеритель высоты нижней границы облаков ДОЛ-2 // Оптический журнал. 2009-№10, вып. 76. с. 29-33.
- 3. Leyton S. M. Short-term probabilistic forecasts of ceiling and visibility utilizing high density surface weather observations / S.M. Leyton, J.M. Fritsch // Wea. Forecast. 2003. Vol. 18, No. 10. P. 891–902.
- 4. Leyton S. M. The impact of high-frequency surface weather observations on short term Probabilistic forecasts of ceiling and visibility / S. M. Leyton, J.M. Fritsch // Wea. Forecast. 2004. Vol. 19, No. 1. P. 145–157.

### INCREASING THE RELIABILITY OF RESEPTION OF AN ECHO SIGNAL AT DETERMINATION OF HEIGHT OF THE LOWER BOUND OF CLOUDS

#### A. V. Demin, E. A. Seledkina (ITMO University)

In this paper methods for determining the height of the cloud bottom are analyzed, an algorithm for processing echoes is proposed, which reduces the number of emitted pulses, thereby improving the quality of the output data.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### АБРАМОВ Александр Михайлович,

заместитель начальника научноисследовательского океанографического центра АО «ГНИНГИ», капитан 1 ранга запаса. Окончил ВВМУ им. М. В. Фрунзе и ВМА им. Н. Г. Кузнецова. Специализация: навигационногидрографическое обеспечение морской деятельности. Автор более 20 печатных работ.

E-mail: alexabr17@gmail.com

#### БЛЕДНОВ Вадим Алексеевич,

старший научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала ФГБУН ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова; канд. техн. н., доктор физ.мат. наук. Окончил Санкт-Петербургский электротехнический институт по специализации радиотехника, гироскопические приборы и устройства. Автор 200 печатных работ.

E-mail: Blednov2@mail.ru

#### БЛЕДНОВ Вадим Вадимович,

инженер Санкт-Петербургского филиала ФГБУН ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова. Окончил Санкт-Петербургский государственный Университет культуры и искусства, по специальности «культурология». Автор 14 печатных работ.

E-mail: Blednov278@mail.ru

#### БОРИСОВ Алексей Анатольевич,

заместитель начальника кафедры в Военнокосмической академии им. А. Ф. Можайского, канд. техн. н., доцент, полковник. Окончил ВКА им. А. Ф. Можайского. Специализация: метеорология. Автор более 30 печатных работ.

E-mail: alebor\_72@mail.ru

#### ВИНОГРАДОВ Константин Анатольевич,

главный специалист по навигационным гидроакустическим системам АО «Аквамарин», кандидат технических наук. Окончил Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ). Специализация — ультразвуковая техника и акустика. Автор более 50 печатных работ.

E-mail: mail@aquamarin.ru

#### Aleksandr M. ABRAMOV,

Deputy Chief of the Research Oceanographic Center, «GNINGI» JSC, Captain I-st Rank (Reserve). Graduated from Frunze Naval College and N. G. Kuznetsov Naval Academy. Specialization: Navigation-Hydrographic Support for Maritime Activity. Author of more than 20 publications.

E-mail: alexabr17@gmail.com

#### Vadim A. BLEDNOV,

Senior researcher, St. Petersburg Branch of the N. V. Pushkov IZMIRAN, CandSc, DSc. Graduated from Leningrad Electrotechnical Institute majoring in radiotechnology, gyroscope devices and systems. Author of 200 publications.

E-mail: Blednov2@mail.ru

#### Vadim V. BLEDNOV,

Engineer, St. Petersburg Branch of the N. V. Pushkov IZMIRAN. Graduated from St. Petersburg State University of Culture and Art, majoring in «culturology». Author of 14 publications.

E-mail: Blednov278@mail.ru

#### Aleksey A. BORISOV,

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, deputy chief of the chair, CandSc, reader, Colonel. Graduated from A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Speciality: meteorology. Author of more than 30 publications.

E-mail: alebor\_72@mail.ru

#### Konstantin A. VINOGRADOV,

Chief specialist for navigation hydroacoustic systems, «Aquamarin» JSC, CandSc. Graduated from Leningrad Electrotechnical Institute. Speciality: ultrasound technology and acoustics. Author of more than 50 publications.

E-mail: mail@aquamarin.ru

#### ДЁМИН Анатолий Владимирович,

заведующий кафедрой оптико-цифровые системы и технологии Санкт-Петербургского НИУ ИТМО, кандидат технических наук, профессор. Окончил ЛИТМО, специализация — оптические приборы и спектроскопия. Автор более 160 научных работ.

E-mail: dav 60@mail.ru

#### ДЬЯКОВ Игорь Валентинович,

ведущий инженер по навигационным гидроакустическим системам АО «Аквамарин». Окончил Ленинградский политехнический институт. Специализация — дозиметрия. Автор трех печатных работ.

E-mail: mail@aquamarin.ru

#### ЖУКОВ Юрий Николаевич,

ведущий научный сотрудник АО «ГНИНГИ», докт. техн. н. Окончил Ленинградский гидрометеорологический институт. Специализация — гидрометеорология. Автор более 150 печатных работ.

E-mail: mail@gningi.ru

#### ЗАДОРОЖНАЯ Тамара Николаевна,

старший научный сотрудник 3 НИО ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, канд. геогр. н., доцент. Окончила Одесский гидрометеорологический институт. Специализация: метеорология. Автор более 250 печатных работ.

E-mail: vaiu@mil.ru

#### ЗАКУСИЛОВ Вадим Павлович,

доцент кафедры гидрометеорологического обеспечения ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, канд. геогр. наук, доцент. Окончил Воронежское высшее военное авиационное инженерное училище. Специализация: метеорология. Автор около 150 печатных работ.

E-mail: zakusilov04@yandex.ru

#### КУЛЕШОВ Юрий Владимирович,

профессор Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, докт. техн. н. Окончил ВКА им. А. Ф. Можайского. Специализация: гидрометеорология. Автор более 100 печатных работ.

E-mail: vka@mil.ru

#### Anatoly V. DEMIN,

Professor, DSc, Head of Department of opto-digital systems and technologies, the St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO). Graduated from LITMO. Specialization: optics and spectroscopy. Author of more than 160 publications.

E-mail: dav 60@mail.ru

#### Igor V. DYAKOV,

Leading engineer for navigation hydroacoustic systems, «Aquamarin» JSC. Graduated from Leningrad Polytechnical Institute. Speciality: dosimetry. Author of 3 publications.

E-mail: mail@aquamarin.ru

#### Yuri N. ZHUKOV,

Leading researcher, «GNINGI» JSC, DSc. Graduated from Leningrad Hydrometeorological Institute. Speciality: hydrometeorology. Author of more than 150 publications.

E-mail: mail@gningi.ru

#### Tamara N. ZADOROZHNAYA,

Military-Educational Scientific Center of the Air Force (MESC), «N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy», senior researcher, CandSc, reader. Graduated from Odessa Hydrometeorology Institute. Speciality: meteorology. Author of more than 250 publications.

E-mail: vaiu@mil.ru

#### Vadim P. ZAKUSILOV,

Military-Educational Scientific Center of the Air Force (MESC), "N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy", reader of the chair for hydrometeorologic support, CandSc. Graduated from Voronezh Military Air Force Engineering College. Speciality: meteorology. Author of about 150 publications.

E-mail: zakusilov04@yandex.ru

#### Yuriy V. KULESHOV,

DSc, professor, Mozhaisky Military Space Academy. Graduated from Mozhaisky Military Space Academy. Specialization: hydrometeorology. Author of more than 100 scientific publications.

E-mail: vka@mil.ru

#### ЛЕНЬКОВ Валерий Павлович,

начальник патентного бюро АО «ГНИНГИ», капитан 2 ранга в отставке, канд. техн. н. Окончил ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина) и КОС при ВВМИУ им. Ф.Э. Дзержинского. Специализация: навигация, гидрография. Автор более 120 печатных трудов, 50 патентов на изобретения.

E-mail: ggc@list.ru

#### МАКОВ Александр Борисович,

докторант кафедры в Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, канд. техн. н., доцент, полковник. Окончил ВКА им. А. Ф. Можайского. Специализация: метеорология.

E-mail: alexmakof@mail.ru

#### СЕЛЁДКИНА Екатерина Андреевна,

Аспирантка СПб НИУ ИТМО. Окончила НИУ ИТМО, специализация — оптико-цифровые системы и технологии. Автор трех научных работ.

E-mail: modest3005@yandex.ru

#### СТАВРОВ Константин Георгиевич,

начальник научно-исследовательского океанографического центра АО «ГНИНГИ», докт. техн. н., профессор. Окончил ЛГУ. Область научных интересов — геофизические исследования. Автор более 100 печатных работ.

E-mail: stavrov@gningi.ru

#### ФЁДОРОВ Александр Борисович,

начальник 2 отдела Центра инновационных исследований АО «ГНИНГИ», капитан 1 ранга в запасе. Окончил ВВМУ им. М. В. Фрунзе. Специальность: инженер-гидрограф. Автор пяти печатных трудов.

E-mail: ggc@list.ru

#### ЧЕРНЯВЕЦ Владимир Васильевич,

заместитель начальника патентного бюро АО «ГНИНГИ», заслуженный изобретатель РФ. Окончил Ленинградский военно-механический институт и Институт промышленной собственности. Специальность: инженерэлектромеханик. Автор более 20 печатных работ, 270 патентов на изобретения.

E-mail: ggc@list.ru

#### ШИРШНЕВ Сергей Павлович,

ведущий инженер высшей квалификации АО «ЦКБ МТ «Рубин». Окончил ВВМУРЭ им. А. С. Попова. Специальность: радиоинженер. Автор пяти печатных работ.

E-mail: Gremixa87@yandex.ru

#### Valery P. LENKOV,

Chief of the Patent Bureau, "GNINGI" JSC, Captain 2 Rank (Ret), CandSc. Graduated from Leningrad Electrotechnical Institute and Officers Classes at Dzerzhinsky Naval College. Speciality: navigation, hydrography. Author of more than 120 publications, 50 patents, for inventions.

E-mail: ggc@list.ru

#### Alexandr B. MAKOV,

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, PhD student, CandSc, reader, Colonel. Graduated from A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Speciality: meteorology. Author of more than 30 publications.

E-mail: alexmakof@mail.ru

#### Ekaterina A. SELEDKINA,

post graduate student, ITMO. Graduated from ITMO. Specialization: opto-digital systems and technology. Author of 3 publications.

E-mail: modest3005@yandex.ru

#### Konstantin G. STAVROV,

Chief of the Researcher Oceanographic Center of «GNINGI» JSC, DSc, professor. Graduated from Leningrad State University. Sphere of scientific interests: geophysical explorations. Author of more than 100 publications.

E-mail: stavrov@gningi.ru

#### Alexander B. FEDOROV,

Chief of 2 division, Center of Innovation Explorations, "GNINGI" JSC, Captain I Rank (Res). Graduated from Frunse Naval College. Speciality: engineer-hydrographer. Author of 5 publications.

E-mail: ggc@list.ru

#### Vladimir V. CHERNYAVETS,

Deputy chief of the Patent Bureau, "GNINGI" JSC, Honoured Inventor of the Russian Federation. Graduated from Leningrad Militarymechanical Institute and the Institute of Industrial Property. Speciality: Engineer-electromechanic. Author of more than 20 publications, 270 patents for inventions.

E-mail: ggc@list.ru

#### Sergei P. SHIRSHNEV,

Leading engineer, CDB ME "Rubin". Graduated from A. S. Popov Naval College of Radioelectronics. Speciality: radio engineer. Author of 5 publications

E-mail: Gremixa87@yandex.ru

### РЕФЕРАТЫ

#### УДК 627.921

Новый алгоритм обработки результатов координирования донных маяков-ответчиков. К. А. Виноградов, И. В. Дьяков. — Навигация и гидрография. — 2017. — № 47. — С. 7—12.

Рассматриваются полученные на основе экспериментальных данных результаты расчета координат донных маяков-ответчиков (ДМО) по известному и вновь разработанному алгоритмам. Показано, что предлагаемый алгоритм обеспечивает большую точность координирования ДМО и дает более устойчивые оценки полученных координат при различной геометрии расположения точек привязки относительно ДМО.

Ключевые слова:

донные маяки-ответчики, алгоритм, координирование, погрешность измерений, навигационные параметры.

#### УДК 621.3.083:621.317.42

Малогабаритный ядерно-прецессионный датчик с компенсацией электрических помех. В. А. Бледнов, В. В. Бледнов. – Навигация и гидрография. – 2017. – N 47. – С. 13–22.

В статье рассмотрен принцип создания ядерно-прецессионного датчика, способного работать в качестве модульного прибора как на борту ферромагнитного судна, так и в обсерватории. Его устойчивость к электрическим помехам увеличена в несколько сотен раз. Приведены результаты испытаний как в лабораторных условиях, так и на борту ферромагнитного судна. Созданный датчик, дополняя метод определения угловых компонент (МОУК), может быть использован на борту движущихся объектов для измерения одной из силовых компонент вектора магнитной индукции. Электромагнитная система разработанного датчика позволяет использовать его для измерения компонент вектора магнитной индукции.

#### Ключевые слова:

ядерно-прецессионный датчик, компенсация электрических помех, лабораторные испытания, исследования на борту ферромагнитного судна, измерение модуля и компонент вектора магнитной индукции

#### УДК 623.46:535

Перспективы применения средств оптической локации для определения местоположения автономного необитаемого подводного аппарата. С. П. Ширшнёв – Навигация и гидрография. – 2017. – No 47. - C. 23-32.

Статья посвящена описанию физики распространения оптического излучения в морской среде, а также анализу путей разработки оптических локационных систем и создания с их помощью специальных карт морского дна.

Ключевые слова: подводные аппараты, автономные необитаемые подводные аппараты, оптические системы, DARPA, средства оптической локации, электромагнитные волны, световой поток, импульсные оптические дальномеры, эффект молекулярного рассеяния.

#### УДК 551.48

Международное сотрудничество по гидрографическим исследованиям в Арктике: теория и практика. К. Г. Ставров. – Навигация и гидрография. – 2017. – № 47. – С. 33–41.

Рассмотрены принципы организации и реализации международного сотрудничества в области изучения и освоения Мирового океана на примере гидрографических исследований Северного Ледовитого океана АО «ГНИНГИ».

Ключевые слова:

международное сотрудничество, гидрографические исследования.

УДК 528.9

Количественный метод определения заносимости акватории. А. М. Абрамов. — Навигация и гидрография. — 2017. — № 47. — С. 42—46.

В статье предлагается метод количественного определения заносимости акватории. В качестве критерия заносимости принимается отношение вычисленных расстояний между картографическими отображениями береговой линии и одной и той же изобаты из съемок рельефа дна, выполненных в разное время. Для вычисления расстояния между ними используется метрика Хаусдорфа.

Ключевые слова:

заносимость акватории, картографическое изображение подводного рельефа, точечные отметки глубин, изолинии, расстояние (метрика) Хаусдорфа.

УДК 534.22:551.46

Метод кластеризации вертикального распределения скорости звука в океане. Ю. Н. Жуков. — Навигация и гидрография. -2017. -№ 47. - C. 47-54.

Кластеризация — это автоматизированная процедура упорядочивания многомерных объектов в сравнительно однородные группы. Дается описание метода кластеризации вертикального распределения скорости звука в океане. Метод позволяет осуществлять автоматизированную кластеризацию массивов вертикального распределения скорости звука и получать репрезентативные кривые вертикального распределения звука для выделенных классов.

Ключевые слова:

кластеризация, вертикальное распределение скорости звука.

УДК 001.5:551.46:608

О возможных путях совершенствования средств и способов исследования акватории по результатам анализа патентной информации. В. П. Леньков, А. Б. Фёдоров, В. В. Чернявец. — Навигация и гидрография. -2017. -№ 47. - С. 54–59.

Проанализированы патенты сотрудников АО «ГНИНГИ» в области совершенствования средств и способов исследования водной акватории. Определены по ним направления развития технических средств и способов. Отмечена роль патентной информации в выявлении инновационных решений по данным направлениям.

Ключевые слова:

инновационные решения, средства и способы исследования акватории, направления развития, патентная информация.

УДК 551.582

Современные пространственно-временные тенденции изменения глобальной температуры воздуха Северного полушария. Т. Н. Задорожная, В. П. Закусилов. — Навигация и гидрография. — 2017. — № 47. — С. 60—66.

В работе исследуются тенденции изменения температуры воздуха, которые произошли за последние десятилетия в северном полушарии в целом, отдельно по широтам, долготам, высотам и месяцам года.

**Ключевые слова:** изменение климата, ход температуры воздуха, свойства атмосферы.

УДК 551.501.74

**Вероятностная модель специализированной системы гидрометеорологического обеспечения.** А. А. Борисов, Ю. В. Кулешов, А. Б. Маков. – Навигация и гидрография. – 2017. – № 47. – С. 67–73.

Разработана математическая модель показателя эффективности функционирования специализированной системы гидрометеорологического обеспечения, учитывающая ее структуру, состав и выполняемые функции.

Ключевые слова:

гидрометеорологическое обеспечение, математическая модель, показатель эффективности.

УДК 620.1.08:551.5:355

Метод сжатых измерений – на службу гидрометеорологического обеспечения Военно-Морского Флота. Ю. Н. Жуков. – Навигация и гидрография. – 2017. – № 47. – С. 73–84.

Приводится краткое описание нового метода сжатых измерений на примере применения его к измерениям гидрометеорологических процессов. Метод позволяет подробно описать изменчивость гидрометеорологических процессов при небольшом числе измерений в случайных пространственно-временных точках.

**Ключевые слова:** метод сжатых измерений, гидрометеорологические измерения.

УДК.621.391.8:551.576

Повышение достоверности приема эхосигнала при определении высоты нижней границы облаков. А. В. Дёмин, Е. А. Селёдкина. – Навигация и гидрография. – 2017. – № 47. – С. 85–92.

В статье рассмотрен процесс определения высоты нижней границы облаков (ВНГО) и проанализированы существующие способы решения уравнения лазерного зондирования. Предложен новый метод обработки эхосигналов, который существенно сокращает необходимое количество импульсов, испускаемых лазерным измерителем, и тем самым упрощает получение выходных данных, что важно в практической деятельности, особенно в сложных метеорологических условиях при выпадении осадков.

**Ключевые слова:** измеритель высоты нижней границы облаков, эхосигнал, метод комплексирования.

### **ABSTRACTS**

**Algorithm of Processing the Results of the Bottom Transponders Co-ordination.** K. A. Vinogradov, I. V. Dyakov. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 7–12.

The results of calculating the bottom transponder co-ordinates by the known and newly developed algorithms are considered. These results were based on the experimental data. It is shown that the proposed algorithm provides a higher accuracy of co-ordinating the bottom transponder and more stable evaluation of the obtained co-ordinates with various geometry of fixing points relative to the bottom transponder.

**Key words:** bottom transponder, algorithm, co-ordination, error in measurement, navigation parameters.

Small-size Nuclear-Precession Sensor with Compensation for the Electric Noise. V. A. Blednov, V. V. Blednov. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 13–22.

The principle used to create the nuclear-precession sensor able to operate as a modular device both on board a ferromagnetic vessel and in an observatory, is considered. Its protection against the electric noise has been increased several hundred times. The results of tests carried out in the laboratory and aboard the ferromagnetic vessel are presented. This sensor, as an addition to the method of finding the angular components, can be used on board the moving objects in order to measure one of the force components of the magnetic induction vector. The electromagnetic system of the sensor allows to use it for measurement of the magnetic induction vector components.

Key words:

nuclear-precession sensor, manifold compensation for electric noise, laboratory tests, studies on board the ferromagnetic vessel, measurement of the module and components of the magnetic induction vector.

Prospects for Employment of Optical Location Aids to Fix the Position of Autonomous Underwater Vehicle. S. P. Shirshnev. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 23–32.

The physics of the optical radiation through the sea water is described. The ways of development of the optical location systems and creation of special-purpose sea bottom charts using them as a basis, are analyzed.

Key words:

underwater vehicles, optical systems, DARPA, optical location aids, electromagnetic waves, light luminous flux, pulse optical range-finders, effect of molecular diffusion.

International Co-operation for Hydrographic Explorations in the Arctic: Theory and Practice. K. G. Stavrov. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 33–41.

The principles of organization and implementation of international co-operation in the sphere of study and mastery of the operations in the World ocean, using the hydrographic explorations of the Arctic Ocean by "GNINGI" JSC as an example, are considered.

**Key words:** international co-operation, hydrographic explorations.

**Quantitative Method of Determining the Sediment Accumulation in the Water Area.** A. M. Abramov. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 42–46.

The method of quantitative determining the sediment accumulation in the water area is proposed. As the criterion of the sediment accumulation the relationship of calculated distances between the cartographic coastline delineation and the same isobaths from the bottom relief surveys carried out in various time periods, is used. To calculate the distance between them, the Hausdorf metrics is used.

Key words:

sedimentation accumulation in the water area, cartographic delineation of the bottom relief, point marks of depths, isolines, Hausdorf distance (metrics).

**Method of Clusterisation of the Vertical Sound Velocity in the Ocean.** Y. N. Zhukov. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 47–54.

The method of clusterisation of the sound velocity in the ocean is described. The method allows to carry out the automated clusterisation of the arrays of the vertical sound velocity distribution and to obtain the representative curves of the vertical sound distribution for the chosen classes.

**Key words:** clusterisation, vertical sound velocity distribution.

On Possible Ways to Improve the Means and Methods of Exploration of the Water Area Using the Results of the Patent Information. V. P. Lenkov, A. B. Fedorov, V. V. Chernyavets. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 54–59.

The patents of the "GNINGI" JSC employees in the sphere of improvement of the means and methods used to explore the water areas are analysed. Using them as a basis, the directions of development for the technical means and methods are determined. The role of the patent information in revealing the innovation solutions in these directions is pointed out.

**Key words:** innovation solution, means and methods of exploration of the water areas, directions of development, patent information.

Modern Space-Time Trend Changes in Global Air Temperature of the Northern Hemisphere. T. N. Zadorozhnaya, V. P. Zakusilov. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 60–66.

This paper investigates the tendencies of air temperature changes that have occurred over recent decades in the Northern hemisphere as a whole, separately for latitudes, longitudes, heights and months of the year.

**Key words:** change of climate, air temperature, atmospheric properties.

**Probabilistic Model of Special-Purpose System of Hydrometeorologic Support.** A. A. Borisov, Y. V. Kuleshov, A. B. Makov. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 67–73.

The mathematical model of performance indicator of operation for the special purpose hydrometeorologic support systems has been developed. The model takes its structure composition and functions into account.

**Key words:** hydrometeorologic support, mathematical model, performance indicator.

Method of Compressed Measurements to Provide the Hydrometeorologic Support for the Navy. Y. N. Zhukov. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 73–84.

The short description of the new method, the method of compressive sensing, using the measurement of hydrometeorologic processes as an example, is presented. The method allows to describe the changeability of hydrometeorologic processes in random samples.

**Key words:** method of compressed measurements, hydrometeorologic measurements.

Increasing the Reliability of Reseption of an Echo Signal at Determination of Height of the Lower Bound of Clouds. A. V. Demin, E. A. Seledkina. – Navigation and Hydrography. – 2017. – No. 47. – P. 85–92.

In this paper methods for determining the height of the cloud bottom are analyzed, an algorithm for processing echoes is proposed, which reduces the number of emitted pulses, thereby improving the quality of the output data.

**Key words:** measuring instrument of height of the lower boundary of clouds, echo signal, complexing method.

### ИНФОРМАЦИЯ

#### Глубокоуважаемые коллеги!

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

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

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук» (редакция 24.03.2017 г.).

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

#### Информация для авторов

Статьи принимаются в формате MS Word с приложением текста на бумаге (шрифт – Times New Roman размером 14, межстрочный интервал 1,5). Все материалы должны быть подписаны автором (авторами).

Объем статьи 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 (для военнослужащих); полное наименование высшего учебного заведения, которое окончил автор; специализация; количество опубликованных научных трудов. Кроме того, авторам необходимо указать контактную информацию: почтовый или 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 научнотехнической информации» агентства «Роспечать». Подписной индекс 60941.

Периодичность выхода – четыре номера в год.

Стоимость одного номера 250 руб., включая НДС 18%.

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

Архив журнала в формате PDF доступен на сайте AO «ГНИНГИ» www.gningi.ru.

Адрес редакции: АО «ГНИНГИ», 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41, Телефон/факс: (812) 327-99-80

E-mail: mail@gningi.ru; info@gningi.ru

# для заметок

### НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ, 2017, №47

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

Подписано в печать 27.03.2017 г. Тираж 300 экз. 32/01 от 28.03.2017 г.

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

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

Журнал «Навигация и гидрография» включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук».

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

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