ISSN 2220-0983

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

72/2023

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

Санкт-Петербург

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

Издается с 1995 года

72
2023

Санкт-Петербург

Главный редактор
к. т. н. В. М. Смолин

Редакционная коллегия:

к. т. н. А. А. Якушев (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; д. т. н. С. И. Мастрюков;
акад. РАН В. Г. Пешехонов; д. т. н., профессор К. Г. Ставров;
д. 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 ученой степени доктора наук»

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

© Акционерное общество
«Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт»
2023

THE STATE RESEARCH NAVIGATION-HYDROGRAPHIC INSTITUTE

NAVIGATION AND HYDROGRAPHY

Published since 1995

72

2023

Saint-Petersburg

Editor-in-chief
V. Smolin, CandSc

Editorial board

A. Yakushev, CandSc (deputy 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; S. Mastryukov, DSc;
V. Peshekhonov, DSc, Acad. RAS; K. Stavrov, DSc, professor;
A. Sharkov, DSc; G. Shchukin, DSc, professor

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

2023

СОДЕРЖАНИЕ

НАВИГАЦИЯ

Мировые тенденции развития морских дифференциальных подсистем в последнее десятилетие. Д. Ф. Миляков 7

Современные методы идентификации моделей областей навигационной безопасности. С. Н. Некрасов 12

Достижения ядерной физики в свете решения задачи определения местоположения подвижного объекта с помощью релятивистских частиц. А. П. Степанов 24

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

Основные результаты гидрографических исследований по обоснованию внешней границы континентального шельфа Российской федерации в период 1998–2023 гг. В. Ю. Бахмутов, Е. А. Гордеева, Е. В. Колобов, А. В. Костенич, К. Г. Ставров 58

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Влияние температуры поверхности океанана на формирование тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана. И. В. Лаврова, О. Н. Топтунова, Т. Р. Шишкина, Е. Г. Алексеева, Ю. В. Ефимова 64

Методологический подход к обоснованию принятия решения о рассеянии переохлажденных волнистообразных облаков нижнего яруса на основе данных наземных измерений. А. П. Доронин, Н. А. Козлова, В. М. Петроченко, Г. Г. Щукин 76

Изменчивость приземной температуры воздуха на Арктической территории России и ее связь с изменениями циркуляции атмосферы. О. Н. Топтунова, И. А. Иванова, О. Г. Анискина, М. А. Моцаков, И. В. Лаврова, Т. Р. Шишкина 87

Результаты современных исследований климатических изменений, влияющих на морскую деятельность. С. И. Мастрюков, В. Ю. Бахмутов 98

Метод оценивания характеристик облачности в неосвещенных в метеорологическом отношении физико-географических районах. А. А. Борисов, А. Б. Маков 110

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 117

РЕФЕРАТЫ 120

CONTENTS

NAVIGATION

Global Trends in the Development of Marine Differential Subsystems in the Last Decade. D. F. Milyakov 7

Modern Methods of Identification of Models of Navigation Safety Areas. S. N. Nekrasov 12

Achievements of Nuclear Physics in the Light of Solving the Problem of Determining the Location of a Moving Object Using Relativistic Particles. A. P. Stepanov 24

HYDROGRAPHY AND MARINE CARTOGRAPHY

The Main Results of Hydrographic Research on the Substantiation of the Outer Boundary of the Continental Shelf of the Russian Federation in the Period 1998-2023. V. Yu. Bakhmutov, E. A. Gordeeva, E. V. Kolobov, A. V. Kostenich, K. G. Stavrov 58

HYDROMETEOROLOGY

Influence of Ocean Surface Temperature on the Formation of Tropical Cyclones in the Northwestern Pacific Ocean. I. V. Lavrova, O. N. Toptunova, T. R. Shishkina, E. G. Alekseeva, Yu. V. Efimova 64

Methodological Approach to Substantiating the Decision on the Scattering of Supercooled Layered Clouds of the Lower Tier Based on Ground-Based Measurements. A. P. Doronin, N. A. Kozlova, V. M. Petrochenko, G. G. Shchukin 76

Variability of Surface Air Temperature in the Arctic Territory of Russia And its Relation to Changes in Atmospheric Circulation. O. N. Toptunova, I. A. Ivanova, O. G. Aniskina, M. A. Motsakov, I. V. Lavrova, T. R. Shishkina 87

Results of Modern Research of Climate Change Affecting Marine Activities. S. I. Mastryukov, V. Yu. Bakhmutov 98

Method of Estimation of Cloud Cover Characteristics in Meteorologically Unlit Physical and Geographical Areas. A. A. Borisov, A. B. Makov 110

INFORMATIONABOUTAUTHORS 117

ABSTRACTS 120

НАВИГАЦИЯ

УДК.656.61.052

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МОРСКИХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ В ПОСЛЕДНЕЕ ДЕСЯТИЛЕТИЕ

Д. Ф. МИЛЯКОВ
(АО «Научный центр прикладной электродинамики»)

По результатам анализа бюллетеней Международной ассоциации маячных служб рассмотрены мировые тенденции изменений в развитии морских дифференциальных подсистем.

Морские дифференциальные подсистемы с использованием контрольно-корректирующих станций (ККС) начали широко применяться в начале 1980-х годов как средство для компенсации погрешностей, искусственно вносимых селективным доступом к системе GPS. После отмены последнего в 2000 г. метод дифференциальной коррекции не утратил свою актуальность и используется для повышения точности координирования потребителей на море и реке.

Для объединения усилий мирового сообщества, обеспечения единства подходов и технических реализаций метода дифференциальной коррекции на море роль координатора в технических вопросах согласилась взять на себя Международная ассоциация маячных служб (МАМС). Здесь надо оговориться, что деятельность МАМС не распространяется на внутренние водные пути государств, если в этом нет исключительной необходимости.

МАМС (в английской аббревиатуре IALA) – это некоммерческая международная техническая ассоциация, основанная в 1957 году, которая объединяет органы управления морской навигации, производителей, консультантов, а также научные и учебные заведения стран мира и предлагает им возможность обмениваться своим опытом и достижениями.

С момента своего основания МАМС разработала несколько важных концепций и систем, таких как:

- система морских ограждений IALA (IALA MBS);
- дифференциальная система GPS (DGPS);
- автоматическая система идентификации (АИС);
- система обмена данными УКВ (VDES);
- развитие службы управления движением судов (СДС).

Одним из документов, публикуемым МАМС по теме морских дифференциальных подсистем (МДПС) является информационный бюллетень (*masterlist*) со списком опорных и передающих станций ДГНСС в диапазоне морской радионавигации (283,5–315 кГц, регион 1; 285–325 кГц, регионы 2 и 3). Название документа меняется, последняя версия 1.8 от октября 2021 года размещена на сайте организации [1].

Далее мы проанализируем, насколько это возможно, тенденции развития морского сервиса дифференциальной коррекции за последние 10 лет по данным, опубликованным в бюллетене МАМС за 2021 год. Документы предыдущих версий на сайте недоступны.

Первые важные и очевидные изменения изложены в ревизии самого документа: в США и Австралии остановлены все DGPS услуги с июня 2020 г. Однако в бюллетень включены Грузия, Египет и Куба, отдельно выделен Тайбей (Тайвань, территория Китая), добавлены станции Великобритании и Ирландии, и удалены страны не обслуживающие дифференциальный сервис. По результатам сравнения данных предыдущих лет, страны, прекратившие обслуживание дифференциального сервиса приведены в табл. 1.

Таблица 1. Страны, прекратившие обслуживание дифференциального сервиса

Страна	Количество ККС на 2018 г.
Австрия	1
Аргентина	4
Азорские острова	2
Алжир	1
Балеарские острова	2
Гавайские острова	3
Германия	7
Канарские острова	2
Шотландия	5
Япония	27
Австралия	16 ККС выключены с июля 2020 г.
США	более 100 ККС выключены с июля 2020 г.
Англия	все 11 ККС выключены с марта 2022 г.
Ирландия	все 3ККС выключены с марта 2022 г.

Под понятием «прекратившие обслуживание сервиса» не стоит понимать, что ККС полностью выключены. Каждая страна вправе подавать или не подавать актуальные сведения о состоянии своих морских дифференциальных подсистем (МДПС) в МАМС. Некоторые станции работают в разных режимах излучаемой мощности, по расписанию или по заявкам, могут находиться на регламентном обслуживании и т. п. В документе имеются неточности, допущения и примечания. Так, в отношении Англии и Ирландии примечания гласят, что в марте 2022 г. все станции остановлены, в Новой Зеландии сервис отсутствует, а для Латвийской станции в Вентспилсе отмечено, что станция не работает уже несколько лет. Создается впечатление, что недостаточность данных компенсируется сведениями, получаемыми ассоциацией либо аналитическим путем (напряженности поля, дальности действия), либо из неофициальных источников.

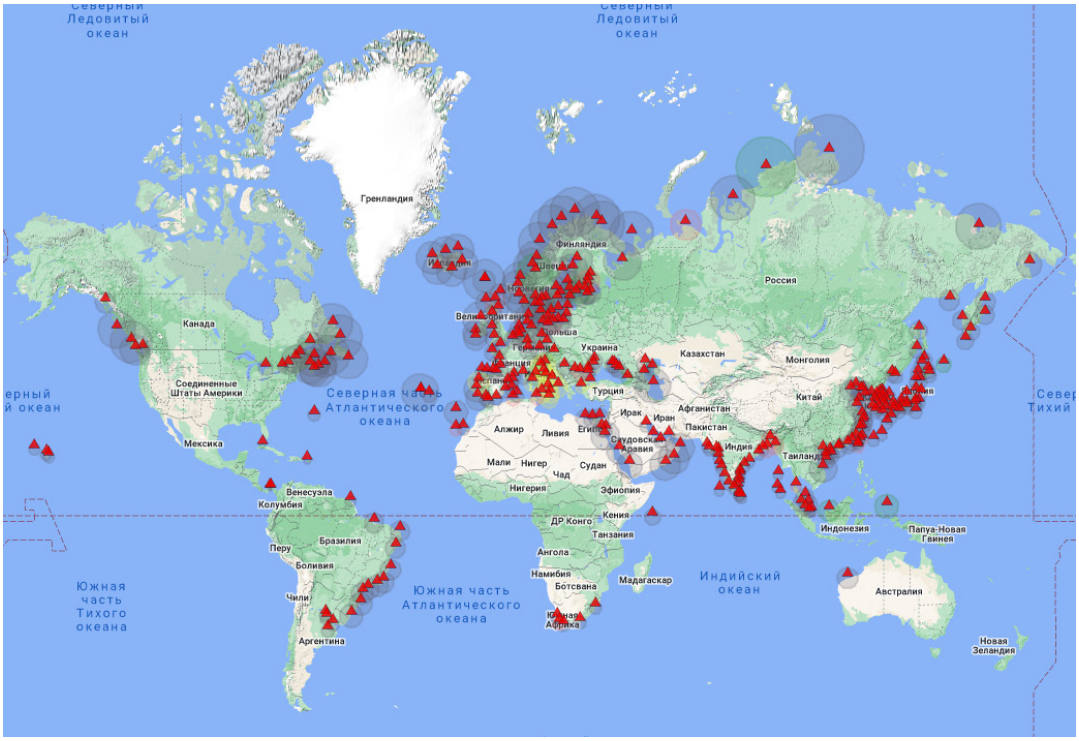
Рассмотрим более подробно часть изменений в данных по конкретным странам, приведенным в табл. 2.

Таблица 2. Изменения в данных о ККС по некоторым странам

Страна	ККС на 2010 г.	ККС на 2022 г.	Примечания
Персидский залив	4	4	Дальность действия уменьшены с 450 до 250 км.
Китай	22	21	ККС Kau Yi Chau теперь числится за Гонконгом
Куба		1	Все данные и название ККС неверные.
Дания	3	4	
Финляндия	11	10	Одна из планируемых ККС не введена.
Франция	7	6	ККС Pen Men (ID 333) исключена.
Грузия		1	Установлена ККС в порту Поти.
Италия	12	0	Все ККС выключены.
Латвия	1	1	Числится, но не работает.
Корея	18	17	
Литва	2	1	Планируемая ККС Nida не введена.
Новая Зеландия	1	0	
Норвегия	20	13	Планируемые 8 ККС не ввели, но ввели 1 ККС помимо плана 2012 г.
Оман		3	Развернуты 3 ККС с дальностями 500 км.
Португалия	4	4	У ККС Horta (ID 342) дальность 545 км.
Румыния	3	2	Исключена ККС Harsova (ID 382).
Россия	25*	30	Включили с список 5 прибрежных ККС.
Саудовская Аравия	2	2	Дальность действия 460 км.
Испания	16	11	Исключены 5 ККС и увеличены заявленные дальности до 180 км.
Швеция	11	10	Планируемая ККС не введена.
Тайланд	2	1	ККС Бангкок выключена, а оставшаяся получила ID 306 из пула номеров Италии.
Турция	8	2	Две последние ККС объявлены выключенными.
Украина	7	3	Плановые станции в Крыму достроила Россия, еще 2 СТАНЦИИ (Змеиный и Одесса) по причине военных действий не работают.
Вьетнам	4	9	Введены 2 планируемые ККС, заявлены еще 3 ККС с дальностями 500 км.

Таким образом, на 2012 год в мире насчитывалось более 530 действующих ККС. Исходя из данных помимо МАМС, на 2021 год в строю осталось менее 400 станций. Действующие на середину 2023 г. ККС стран мира приведены на рисунке.

Основная доля исключенных станций приходится на технологически развитые страны, такие как США, Англия, Япония, обладающие своими национальными спутниковыми группировками и обеспечивающие широкозонные сервисы дифференциальной коррекции типа SBAS. Часть исключенных континентальных ККС США переоборудована для передачи широковещательных сигналов оповещения. Практически все континентальные ККС России в бюллетень не включалась как не отвечающие специфике МАМС.



Размещение действующих в мире ККС на 2023 г.

Просматривается тенденция свертывания программ дальнейшего развертывания морских ККС, что косвенно говорит о снижении интереса со стороны конечных потребителей к сервису дифференциальной коррекции. Одной из причин такого снижения является дальнейшее развитие методов и систем глобальной высокоточной навигации типа спутниковых систем дифференциальной коррекции (SBAS), которые в ближайшей перспективе и с высокой долей вероятности вытеснят МДПС с рынка ввиду меньшей эффективности последних. Ввод новых, как правило, запланированных ранее ККС, отмечен в развивающихся странах и в необорудованных ими районах Мирового океана. Также новые или модернизированные ККС декларируют более значительные дальности действия – до 550 км.

Приведенные в бюллетене дальности действующих ККС в целом не изменились, как не изменились и значения расчетной напряженности электромагнитного поля на границе зон от 75 до 100 мкВ/м.

Вызывает сомнения перечень типов предложений стандарта RTCM [2], указанных как передаваемые для конкретных ККС. По данным бюллетеня только три Украинские ККС передают дифференциальные поправки по ГНСС ГЛОНАСС. Фактически подавляющее число ККС России и часть ККС Китая передают сообщения типа 31, 32, 33 и т. п. В качестве справочной информации приведем назначение типов сообщений в МДПС согласно рекомендациям RTCM 2.3 (табл. 3).

Таблица 3. Основные сообщения МДПС согласно RTCM 2.3

Номер типа сообщения GPS	Наименование	Номер типа сообщения ГЛОНАСС
1	Поправки ГНСС (для всех видимых КА)	31
3	Параметры опорной станции ККС	32
5	Техническое состояние созвездия	33
6	Нуль-кадр	6
7	Альманахи радиомаяков	35
9	Подгруппа «быстрых» поправок GNSS (взамен типов 1 или 31)	34 (N>1)
15	Ионосферные поправки	
16	Специальное текстовое сообщение	36

Таким образом, анализ доступных сведений из бюллетеней МАМС с временным лагом в 10 лет подтверждает две тенденции развития МДПС стран мира: во-первых, сокращение сервисов высокоточной навигации посредством морских дифференциальных подсистем на базе ККС; во-вторых, увеличение дальности зон отдельных станций за счет модернизации передающих систем.

В дополнение к изложенному необходимо отметить, что продолжается процесс совершенствования существующих и развитие новых спутниковых навигационных технологий. В настоящее время наибольший импульс развития получили спутниковые, широкозонные и региональные системы дифференциальной коррекции с использованием методов *Real Time Kinematic* (*RTK*, в переводе с англ. – «кинематика реального времени») и *Precise Point Positioning* (*PPP*, в переводе с англ.– дословно «позиционирование высокой точности»). Ведется техническая проработка возможности внедрения методов *RTK* и *PPP* в существующие МДПС и оценка их эффективности.

Другим направлением перспективного развития МДПС является их интеграция с другими сервисами высокоточной навигации и комплексирование в навигационной аппаратуре потребителей возможностей различных систем дальней радионавигации, включая элементы искусственных нейронных сетей и интеллекта для обеспечения перспективной навигации безэкипажных судов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт IALA. Topical matters. Positioning, Navigation and Timing. URL: https://www.iala-aism.org/technical/positioning-navigation-and-timing/world-dgnss-stations-list/ (дата обращения 22.07.2023).
2. Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service RTCM 10402.3.

GLOBAL TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MARINE DIFFERENTIAL SUBSYSTEMS IN THE LAST DECADE

D. F. Milyakov (Scientific Center of Applied Electrodynamics, JSC)

Based on the results of the analysis of the bulletins of the International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, the world trends of changes in the development of marine differential subsystems are considered.

УДК 629.12.001.2

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ОБЛАСТЕЙ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

С. Н. НЕКРАСОВ (АО «ГНИНГИ»)

Приведен обзор методов оценки дистанций расхождения судов на базе экспертных методов, методов интеллектуального анализа на основе случайных лесов и методов, основанных на прогнозе взаимного положения судов и представления судна в виде области, характеризующей качество управления и влияния природных морских условий. Показана связь изменчивости относительной скорости расхождения со случайными погрешностями прогноза положения судов при расхождении. Произведено сравнение достоинств и недостатков методов оценки предполагаемых дистанций расхождения судов. Обоснованы подходы к количественной оценке текущих навигационных рисков расхождения судов.

Обеспечение навигационной безопасности плавания является важной и сложной задачей, что вытекает из возрастающей роли судоходства, перспектив перехода к полной автоматизации процесса судовождения, повышения интенсивности судопотоков, а также экологических проблем и т. п.

Процесс безопасного расхождения судов в море является качественно сложным процессом, успешность которого зависит от влияния многих факторов: навигационно-гидрографических (НГУ) и гидрометеорологических условий (ГМУ), динамических свойств судов, подготовленности и опыта судоводителей и т. д. Следует отметить, что руководящие документы по организации судовождения и предупреждения столкновений не всегда предоставляют конкретные рекомендации по расхождению в различных условиях. Поэтому можно сделать заключение об актуальности работ, связанных с оценкой навигационных рисков столкновений, позволяющих принимать обоснованные решения по маневрированию. Основные направления исследований связаны с оценкой кратчайшей дистанции расхождения между судами и возможностями получения качественных или количественных характеристик навигационного риска расхождения кораблей в море, в прибрежных районах и в портовых зонах. Качественные методы оценки риска, основанные на экспертных оценках, вошли в руководящие документы Международной морской организации (ИМО) и получили достаточное распространение в практике решения задач обеспечения навигационной безопасности плавания [1].

Однако широкого применения в корабельных системах обеспечения навигационной безопасности плавания и поддержки принятия решения в каждом конкретном случае расхождения они не получили, по всей видимости, из-за их субъективности и невозможности учесть текущие обстоятельства расхождения.

Среди многих направлений и подходов к решению проблем безопасного расхождения следует выделить работы по определению областей безопасного расхождения (ОБР) («доменов»). Действительно, определив ОБР и введя их в

обязательную практику расхождений, можно добиться резкого снижения навигационных рисков столкновений [2, 3]. Под ОБР («доменом») следует понимать некоторую область вокруг судна, попадание в которую динамических или статических объектов может привести к опасной навигационной ситуации, связанной, в первую очередь, со столкновением с ними. По своей сути это геометрическое место точек, соответствующих наименьшим безопасным дистанциям сближения с динамическими или статическими объектами.

В настоящее время наметились следующие направления определения ОБР.

В аналитических подходах, связанных с определением зоны навигационной безопасности (ЗНБ), делается попытка учесть динамические свойства судна и его размерения, управляемость, поворотливость. Это, безусловно, важные, но не определяющие факторы, влияющие на адекватное описание модели ЗНБ, кроме того, аналитические методы не позволяют определять текущие навигационные риски.

Большинство других методов основано на апостериорном анализе эмпирических данных о расхождениях судов в море. В качестве исходной информации используются данные о расхождении судов, полученные с использованием радиолокационной станции (РЛС) или автоматизированной информационной системы (АИС). Особенности апостериорного статистического анализа расхождений, как и любого статистического анализа, связаны с оценкой однородности, стационарности и эргодичности наблюдаемых процессов, что крайне затруднено при анализе процессов расхождений судов в смысле значительной изменчивости факторов, влияющих на этот процесс [4].

Кроме того, в качестве модели области ОБР предлагаются различные виды моделей от круга до эллипсоида, при этом совершенно не учитывается, что у рассматриваемого процесса помимо математического ожидания существуют и другие моменты (дисперсия, асимметрия и т. п.), изменчивость которых и определяет области неопределенности дистанций расхождения. Это также не позволяет оценить текущее значение навигационного риска, под которым следует понимать вероятность нахождения любой области судна – цели в ЗНБ, а изменчивость этой вероятности во времени будет определять динамику изменения навигационного риска.

Учитывая потенциальные недостатки статистических эмпирических подходов, следует обратить внимание на применение методов нечеткой логики, которые в какой-то степени способствуют учету ненаблюдаемого (неизмеряемого) многообразия факторов, влияющих на расхождение судов. Эти методы позволяют связать размеры ОБР с размерениями судов и навигационными рисками. Однако следует заметить, что модель появления навигационного риска определяется эмпирически достаточно формально и не подлежит практической интерпретации, т. е. не обладает степенью общности.

Достаточно интересен подход, связанный с применением экспертных методов в оценке областей ОБР. Методы экспертных оценок обладают тем свойством, что позволяют выявить основные представления судоводителей об ожидаемых кратчайших дистанциях расхождения при различных типовых ситуациях расхождений. В качестве основных вариантов расхождений рассматриваются расхождения судов на встречных курсах, при пересечении курса цели и при обгоне. При этом следует полагать, что различные по опыту мореплавания и должности специалисты могут по-разному оценивать необходимые, по их мнению, дистанции кратчайшего сближения с целями.

Одним из вариантов экспертных оценок является опрос судоводителей с различным опытом плавания об их представлениях о желательных кратчайших дистанциях расхождений при разных ситуациях маневрирования: на встречных курсах, при обгоне и при пересечении курса судна-цели.

Результаты одного из таких экспертных исследований [2] приведены в табл. 1, где D_1/L – отношение дистанции кратчайшего сближения к длине судна при расхождении методом пересечения курса цели, D_2/L – отношение дистанции кратчайшего сближения к длине судна при расхождении на встречных курсах, D_3/L – отношение дистанции кратчайшего сближения к длине судна при обгоне. Для учета длины расходящихся судов значения дистанций расхождений нормированы длинами судов.

Таблица 1. Результаты выбора судоводителями желательных дистанций расхождения для разных типов маневра расхождения

1	Судоводители	Длина судна L(м)	D_1/L	D_2/L	D_3/L
2	Капитаны	278	7,76	4,57	4,19
3	Старшие помощники капитана	238	5,32	4,01	3,24
4	Второй помощник капитана	236	5,56	3,75	3,51
5	Третий помощник капитана	229	6,01	4,27	4,28

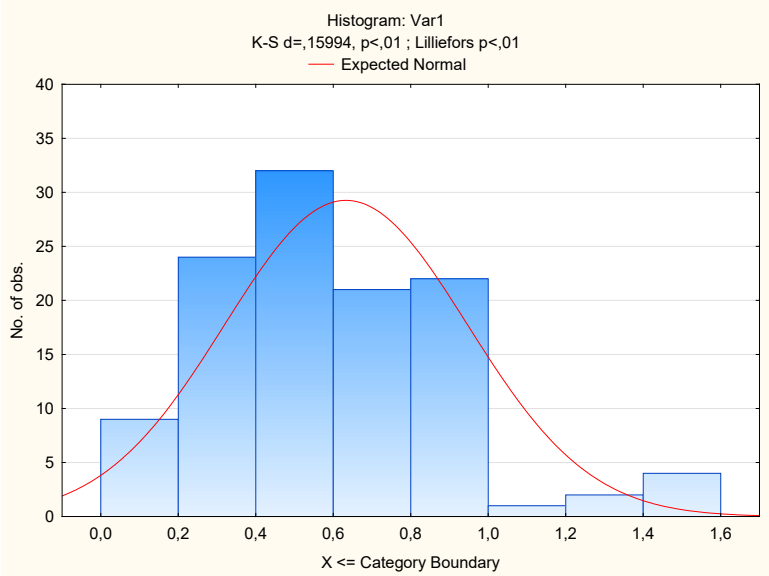
В табл. 2 приведены значения дистанций расхождения для судов, длина которых составляет 300 м.

Таблица 2. Ожидаемые значения кратчайших дистанций расхождений при разных типах маневрирования при длине судна L= 300 м

Судоводители	D_1 (м)	D_2 (м)	D_3 (м)
Капитаны	2328	1371	1257
Старшие помощники капитана	1596	1203	972
Второй помощник капитана	1668	1125	1053
Третий помощник капитана	1803	1281	1284
Средние значения	1767	1224	1116

Из приведенных результатов следует, что ожидаемые кратчайшие дистанции расхождения сильно зависят от размерений судов. Они отражают представления, основанные на личном опыте мореплавания, а указанные параметры маневра расхождения – своеобразные эмпирические знания об ожидаемом характере маневрирования. Кроме того, эти данные свидетельствуют о большой изменчивости желательных дистанций расхождения как для разных типов маневров, так и для разных по опыту судоводителей.

Любопытно представить ситуацию выбора дистанций расхождения для любых по длине судов, если на вахте находится любой из выбранной группы экспертов. Результаты статистического анализа дистанций расхождения для различных способов расхождения при такой постановке задачи приведены на рисунке. Математическое ожидание дистанции расхождения составило 1172 м, а среднее квадратическое отклонение – 580 м.



Гистограмма распределения дистанций расхождения и ее аппроксимация нормальным законом

Из приведенного следует, что, по мнению судоводителей, ожидаемые дистанции расхождения зависят от размерений судов, а изменчивость самих дистанций имеет вероятностный характер, а значит, и области зон безопасного расхождения тоже имеют вероятностный характер. Для всех вариантов расхождений радиус области безопасного расхождения будет соответствовать математическому ожиданию общего распределения дистанций расхождения, а среднее квадратическое отклонение означает изменчивость этого радиуса.

Использование представлений об эмпирически определенных ОБР имеет несколько преимуществ. Они позволяют проводить оценку взаимодействия судов на основе фактических данных, не полагаясь на субъективные данные и не определяя априори, что такое ситуации столкновения. Тем не менее определение эмпирических ОБР сопряжено с тремя ключевыми проблемами.

Во-первых, предлагаемые подходы не способны охватить или разделить влияние множества взаимосвязанных переменных, и, следовательно, предыдущие исследования обычно использовали только несколько частных факторов.

Во-вторых, такие исследования изолированы от отдельных самостоятельных исследований конкретных водных путей и, следовательно, не имеют обобщения на другие области, подлежащие анализу (открытое море, прибрежные районы и подходные пути к портам).

В-третьих, огромные объемы данных, необходимых для отражения различных условий и характеристик водного пути, делают этот подход дорогостоящим с точки зрения вычислений.

В последнее время при анализе дистанций расхождения стали широко применяться методы искусственного интеллекта и, в частности, методы глубокого машинного обучения и методы случайных лесов [3]. В качестве исходных данных в методах глубокого машинного обучения для оценки и прогнозирования дистанций

расхождения судов использовались огромные данные (несколько десятков миллионов) расхождений судов в различных районах плавания при различных типах маневрирования, которые были получены по накопленным данным измерения положений судов с использованием АИС.

В основу глубокого машинного обучения положены хорошо известные методы многомерного статистического анализа [4]. При этом избыточный исходный материал должен быть сегментирован и сгруппирован особым образом, а в блоки последующего анализа отбираться данные, учитывающие [5, 6]:

– типы маневров расхождений (на встречных курсах, при обгоне и при пересечении курсов);
– области расхождения (открытое море; районы, расположенные от береговой черты на расстоянии от 5 до 12 км; районы, удаленные от берега менее чем на 5 км);
– скорости расходящихся судов;
– типы и размеры расходящихся судов и т. п.

Это позволило получить достаточно интересные данные о характере расхождений по множеству из нескольких миллионов расхождений по всему Мировому океану. Так, например, частоты проявления различных типов расхождений примерно одинаковы, наибольшее число расхождений (до 65 %) происходит в прибрежных районах моря, до 70 % процентов расхождений происходит на скоростях до 10 узлов, до 80 % расходящихся судов имеют длину до 250 м и т. п.

Однако главным вопросом является оценка влияния определяющих факторов на реализованные дистанции расхождения и формирование прогноза дистанций расхождения на основе опыта мореплавания в глобальном масштабе. Для этой важной цели исследования использовались методы глубокого машинного обучения, которые в настоящее время являются одним из перспективных направлений развития и применения искусственного интеллекта в судовождении.

Одним из направлений в глубоком машинном обучении является метод случайных лесов – популярный алгоритм обучения на основе ансамблевого дерева. Метод случайных лесов широко применяется ко многим проблемам регрессии и классификации данных и обладает такими неотъемлемыми свойствами, как скорость обучения и надежность при использовании многомерных и несбалансированных наборов данных [6]. Случайные леса состоят из множества деревьев решений, которые сами состоят из корневого узла, дочерних узлов и терминальных узлов. Корневой узел состоит из обучающих данных, которые разделены на дочерние узлы на основе атрибута. Переменные могут далее быть разбиты на последующие дочерние узлы. Алгоритм стремится гарантировать, чтобы каждый дочерний узел был максимально однороден, и когда это достигается, узел становится конечным узлом.

Деревья решений склонны к переобучению, поскольку они способны воспроизводить структуру обучающих данных. Чтобы преодолеть это, в методе случайных лесов вводят в алгоритм бэггинг (агрегация начальной загрузки) и случайный выбор данных (бустинг). Бэггинг включает выборку обучающего набора данных с заменой, а бустинг включает случайный выбор атрибутивных переменных при разделении набора данных.

По таким выборкам обучающего набора данных с последующим построением деревьев решений оценивается среднее (математическое ожидание) предсказаний каждого дерева, которые используются для генерации результирующего предсказания. В результате случайный лес представляет собой ансамбль деревьев

решений, разнообразие которых позволяет избежать переобучения. Кроме того, алгоритмы случайных лесов позволяют рассчитать относительную важность каждого признака при создании предсказания. Важность функции, также называемая важностью Джини, рассчитывается путем сравнения того, как узлы дерева, использующие каждый признак, в среднем уменьшают дисперсию предсказания. Помимо выработки осредненного прогноза дистанции расхождения, в различных условиях метод случайного леса позволяет оценить статистическую зависимость факторов, формирующих соответствующее дерево решений между собой и выявить значимые факторы.

В результате применения метода случайных лесов удалось установить следующее.

1. Дистанции расхождений в выбранных условиях и сегментированных ограничениях представляют собой набор данных, изменяющихся в значительных пределах, что свидетельствует о принципиальной изменчивости их значений в реальных условиях (табл. 3).

2. Среди выбранных факторов наиболее значимыми являются районы расхождений и размеры судов.

В основе метода случайных лесов лежат методы многомерной статистики, а значит изменчивость средних значений, которые приведены в табл. 3, можно оценить погрешностями оценивания средних. Если предположить, что оценка средних распределена по нормальному закону, то можно с вероятностью $P = 0{,}95$ полагать, что частные средние находятся в пределах указанных в табл. 3 значений, что позволяет оценить глобальное среднее и его среднюю квадратическую оценку (табл. 4).

Таблица 3. Дистанции расхождений судов при разных типах маневров

	Дистанция до берега менее 5 км	Дистанция до берега от 5 до 15 км	Дистанция до берега более 15 км
Расхождение на встречных курсах, м	500–3000	500–3000	1000–3000
Расхождение при обгоне, м	500–3000	500–3000	1200–3000
Расхождение при пересечении курса, м	1000–3000	1000–3000	800–3000

Таблица 4. Среднее значение (*M*, м) и средняя квадратическая оценка (СКО, м) дистанции расхождения

	Дистанция до берега менее 5 км	Дистанция до берега от 5 км до 15 км	Дистанция до берега более 15 км
Расхождение на встречных курсах, м	*M*=1750 СКО =312	*M*=1750 СКО =312	*M*=2000 СКО =500
Расхождение при обгоне, м	*M*=1750 СКО =312	*M*=1750 СКО =312	*M*=2100 СКО =450
Расхождение при пересечении курса, м	*M*=2000 СКО =500	*M*=2000 СКО =500	*M*=1900 СКО =550

Таким образом, применение метода случайных лесов для анализа и прогноза дистанций расхождения, а значит, и областей навигационной безопасности как геометрического места точек этих дистанций показало следующее.

1. Для уточнения свойств существующих в реальной морской практике и реализованных дистанций расхождения удалось использовать громадный статистический материал, что позволило получить обобщенные данные по результатам мореплавания, в чем несомненная польза применения методов интеллектуального анализа данных.

2. Как и следовало ожидать, реальные экспериментальные данные свидетельствуют о большой изменчивости дистанций расхождения судов в море в различных условиях.

3. Для использования экспериментальных данных, полученных с применением интеллектуальных методов их обработки, в интересах прогноза текущих значений дистанций расхождения необходимо учитывать не только математическое ожидание дистанции расхождения, но и среднее квадратическое отклонение оценки математического ожидания, что пока в методе случайных лесов не применяется.

Огромные усилия, направленные на выявление топологии зоны навигационной безопасности не учитывают многообразие и изменчивость значений дистанций расхождения, поэтому целесообразно перейти от представлений областей безопасного расхождения в виде эллипсоидов к представлению в виде окружностей. Предложенные подходы не позволяют оценивать ожидаемые значения навигационных рисков столкновений, которые предлагается оценивать качественно, что не позволяет ставить и решать задачи управления навигационными рисками как при расхождении двух судов, так и при расхождении с групповой целью. Сравнение прогнозируемых значений дистанции расхождения, полученных с использованием методов случайных лесов и с помощью методов экспертных оценок, показало их достаточную схожесть.

Рассмотренные выше методы свидетельствуют о возрастающем внимании к определению ОБР и к оценке навигационных рисков с привлечением самых современных научных подходов и методов. В первую очередь, следует отметить ярко выраженную тенденцию использования методов глубокого машинного обучения с настройкой нейросетей в интересах прогноза необходимой кратчайшей дистанции расхождения. Многообразие подходов к уточнению ОБР объясняется естественной неопределенностью, свойственной процессу маневрирования при расхождении судов, источниками которой являются:

1. Стохастичность самой системы навигации, которая зависит от множества факторов морской среды, системы наблюдений за обстановкой, качеством управления судном и т. п.

2. Неполнота наблюдаемых данных – естественная изменчивость параметров динамики движения судов, необходимость решения задач расхождения с групповой целью, особенно в районах интенсивного судоходства и т. п.

3. Неполнота модели, так как расхождение судов – всегда активный процесс целеполагания с изменяющимися параметрами, которые определяют изменчивость параметров маневра (вектор относительной скорости, плановую траекторию пути, влияние систем управления движением на расхождение и т. п.).

Именно поэтому возникают большие системные трудности как текущего анализа навигационной обстановки, так и прогноза развития ситуации.

К общим недостаткам современных аналитических подходов к решению задач обеспечения навигационной безопасности плавания и, в частности, при обосновании решения задач расхождения судов следует отнести:

1. Представление судна как объекта навигации в виде точки со всеми вытекающими последствиями. Для крупнотоннажных судов длиной 300–400 м дистанция расхождения особенно в стесненных для плавания районах соизмерима с их размерениями, поэтому представление судов точками является явно неполным.

2. Обоснование решения на маневр расхождения судов по своей объективной природе относится к задачам прогноза, а решение задач прогноза в условиях неопределенностей всегда сопровождается появлением погрешностей, которые могут влиять на уровень навигационного риска столкновения судов.

Для расширения представлений о модели движения судна как пространственного объекта была поставлена задача идентификации тонкой модели движения судна, которая помимо описания движения центра тяжести судна учитывает и изменчивость маневренной полосы движения, что позволяет учесть модель движения носа и кормы судна, а значит, описывать движение любой точки судна. Такую модель удалось построить по результатам плавания судов в Финском заливе с учетом влияния текущих НГУ и ГМУ, всей системы навигационного оборудования и системы управления движения с элементами лоцманской проводки.

Полученная модель характеризуется областью, в пределах которой с вероятностью 0,95 будет находиться любая точка судна – «зона положений точек судна» (ЗПТС). В основу идентификации подобных моделей положены оценки изменчивости положения центра судна относительно оптимальной траектории и изменчивости маневренной полосы движения судна с элементами глубокого машинного обучения, которые являются в настоящее время наиболее продвинутыми методами интеллектуальной обработки данных.

В результате было установлено, что любая точка судна, в том числе нос и корма, будут с вероятностью P=0,95 находится в окружности радиусом R = 0,75 Lс (Lс–длина судна) [7, 8]. При этом ветер не должен превышать 12 м/с, течение 0,2 узла, СНО имеет типовой характер, плавание осуществляется под управлением СУДС при лоцманской проводке. Вместе с тем положение судна характеризуется не точкой в пространстве, а областью, что в большей степени соответствует реальной ситуации, а также имеет принципиальное отличие от рассмотренных выше современных подходов к выбору дистанции расхождения со встречным судами, да и вообще от известных расчетных методов обоснования маневрирования при расхождении.

Применение представления судна не точкой, а областью в пространстве определяет необходимость уточнения определения дистанции между судами. Действительно, рассмотрим простой случай сближения судов на встречных курсах. Как правило, измеренная дистанция приводится либо к центру корабля, либо к положению мостика. Тогда при сближении двух судов длиной 300 м вплотную дистанция между их центрами составит 300 м, что является явным парадоксом. Поэтому дистанцию между судами следует уменьшать на величину суммы двух радиусов ЗПТС.

Второй принципиальной особенностью предлагаемого подхода к организации маневра расхождения следует отнести необходимость учета погрешностей прогноза ожидаемой (необходимой) дистанции расхождения. Действительно, дистанция расхождения оценивается по относительному положению судна относительно цели (по пеленгам и дистанциям) и по относительной скорости движения (по курсу относительному и по скорости относительной). Совершенно понятно, что оценка

дистанции расхождения является типовой прогностической задачей, в которой кроме самого прогноза необходимо определять и погрешности прогноза.

Прогноз относительного положения судна определяется по среднему значению модуля относительной скорости, а погрешность прогноза по корреляционной матрице случайной изменчивости составляющих вектора относительной скорости [9]. Относительная скорость (V_p) зависит от скоростей расходящихся судов:

$$V_p = V_1 + V_2 - V_1 V_2 \cos Q, \tag{1}$$

где V_1, V_2– скорости расходящихся судов,

$Q = K_1 - K_2$ – разности курсов расходящихся судов.

Скорость судна в море обладает изменчивостью, которая зависит от течения, ветрового дрейфа, динамики судна, качества управления судна по курсу и т.п. Если известна модель случайной изменчивости скорости, то параметры прогноза изменчивости расстояния за время прогноза $t_п$ составят:

– среднее значение ожидаемого расстояния – это произведение матрицы средних значений на время прогноза,
– дисперсионная матрица погрешностей прогноза ожидаемого расстояния.

Предположим, что модель $\boldsymbol{V}\rho\ (t)$ известна и описывается стационарным нормальным случайным процессом:

$$\boldsymbol{V}\rho\ (t) = \mathrm{norm}\ (M[\boldsymbol{V}\rho\ (t)],\ K_{v1}\ (\tau)), \tag{2}$$

где $M[\boldsymbol{V}\rho\ (t)]$ – матрица средних значений проекций случайного процесса $\boldsymbol{V}\rho(t)$ на параллель и меридиан,

$K_{vp}\ (\tau)$ – ковариационная матрица случайного процесса $\boldsymbol{V}\rho(t)$,

$$K_{v1}\ (\tau) = \begin{vmatrix} DnK_{v1}\ (\tau) & 0 \\ 0 & DeK_{v2}\ (\tau) \end{vmatrix}$$

Dn, De – дисперсии нордовой и остовой составляющих относительной скорости расхождения,

$K_{v1}\ (\tau), K_{v2}\ (\tau)$ – автокорреляционные функции нордовой и остовой составляющих относительной скорости.

Далее составляющие случайного процесса $\boldsymbol{V}\rho(t)$ рассматриваются как статистически независимые при равенстве нулю взаимных корреляционных функций, что часто соответствует реальным условиям плавания.

Известно, что дисперсия пройденного расстояния связана со случайной составляющей скорости выражением [10]:

$$D_s(t) = 2\int_0^t (\ t - \tau) Kv\ (\ \tau) d\tau, \tag{3}$$

здесь t – ожидаемое (прогнозируемое) время маневра.

Это выражение имеет два асимптотических случая.

1. При времени плавания $t \to 0$ (как правило, при времени t в 2–3 раза меньшем интервала корреляции случайного процесса $V(t)$), предел выражения (3) стремится к следующему значению:

$$\lim_{t \to 0} \mathrm{Ds}(t) = 2\, Dv\mathrm{t}^2, \tag{4}$$

где Dv – дисперсия случайной составляющей скорости,

t – время прогноза (время маневра).

2. Если время выполнения маневра значительно превышает интервал корреляции случайного процесса $V(t)$ (как правило, такое превышения составляет 3–4 интервала корреляции), то предел выражения (3) при $t \to \infty$ стремится к выражению вида:

$$\lim_{t \to \infty} Ds(t) = 2\, DvT\, t, \tag{5}$$

где T – интервал корреляции случайного процесса $V(t)$.

Таким образом, переходя к многомерному случаю по аналогии с выражением (3) можно заключить, что при небольшом времени решения задачи расхождения двух судов и с учетом равенства и независимости статистических характеристик случайных составляющих процессов скоростей 1-го и 2-го судов дисперсионная матрица относительной скорости $\boldsymbol{V}\rho(t)$ составит:

$$Dv_{\rho} = \begin{vmatrix} Dvn1 + Dvn2 & 0 \\ 0 & Dve1 + Dve2 \end{vmatrix}, \tag{6}$$

где $Dvn1 + Dvn2$ – сумма дисперсий нордовых составляющих скоростей 1-го и 2-го судна,

$Dve1 + Dve2$– сумма дисперсий остовых составляющих скоростей 1-го и 2-го судна.

Переходя к круговому распределению изменчивости относительной скорости $\boldsymbol{V}\rho(t)$, можно определить СКО$\sigma_{V\rho}$, которое через время плавания t определит радиус окружности в пределах которой и будет с некоторой вероятностью находиться судно вследствие неопределенностей в относительной скорости:

$$\sigma_{V\rho} = \sqrt{Dvn1 + Dvn2 + Dve1 + Dve2} = \sqrt{4Dv}. \tag{7}$$

Ранее было принято, что закон распределений случайного процесса $\boldsymbol{V}\rho(t)$ близок к нормальному. Однако это допущение иногда полностью не соблюдается. Поэтому для получения более общих результатов можно воспользоваться свойством большинства симметричных законов распределений вероятностей, для которых значения квантилей с вероятностным обеспечением 0,95 одинаково [4, 5]. Этот подход в какой-то степени снижает априорную неопределенность статистических характеристик случайного процесса $\boldsymbol{V}\rho(t)$.

Окончательно предельное с вероятностью P=0,95 значение радиуса окружности прогнозируемого положения судна в относительном движении при расхождении с другим судном определяется за время прогноза (маневра) t:

$$\sigma_s = 4\sqrt{2}\sigma_v t\ . \qquad (8)$$

Ранее была введена характеристика, отображающая область нахождения любой точки судна, которая является окружностью радиусом R = 0,75 Lс. Учитывая тот факт, что положение любой точки судна при прогнозировании на время маневра будет сопровождаться погрешностями прогноза (8), можно определить общий радиус зоны навигационной безопасности при расхождении судов:

$$R_{знб} = R_1 + R_2 + \ 4\sqrt{2}\sigma_v t, \qquad (9)$$

где R_1= 0,75$L_{c\,1}$ – область 1-го судна,
R_2= 0,75$L_{c\,2}$ – область 2-го судна,
t – время маневра.

В табл. 5 приведены значения зоны навигационной безопасности при расхождении двух судов длиной 300 м в зависимости от времени маневра(t) и среднего квадратического значения изменчивости относительной скорости расхождения.

Таблица 5. Дистанции расхождения судов длиной 300 м в зависимости от времени маневра и изменчивости относительной скорости расхождения

Время маневра, ч	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
σ_v =0,1 узл.	555 м	660 м	765 м	866 м	970 м
σ_v=0,2 узл.	660 м	870 м	1074 м	1382 м	1498 м
σ_v= 0,3 узл	765 м	1080 м	1386 м	1698 м	2010 м

Сравнение результатов определения дистанций расхождения предложенным методом и дистанций, определенных с помощью экспертных методов и методов глубокого машинного обучения, показывает, что они в основном совпадают. Существенным отличием от ранее применяемых подходов является интерпретируемость предложенной модели расхождения и выявление зависимости дистанции расхождения от времени маневра, что позволяет получить области (зоны) навигационной безопасности и решить задачу количественного определения уровня навигационного риска.

Следует отметить, что вопрос о количественной оценке навигационных рисков расхождений в современных методах не решен. В основном делаются попытки только качественной оценки навигационных рисков.

Предложенный подход на основе учета объективных стохастических неопределенностей параметров движения судов при расхождении и экспериментального опыта, полученного с использованием интеллектуальных методов глубокого машинного обучения, позволяет оценивать текущие значения навигационного риска. Понятно, что области безопасного расхождения являются геометрическим местом точек, необходимых с точки зрения навигационной безопасности дистанций расхождения, которые по своей природе являются стохастическими процессами со своими характеристиками (математическим ожиданием, дисперсией и т. п). При этом оба расходящихся судна обладают собственными областями навигационной безопасности, поэтому определение количественного значения навигационного риска сводится к определению

геометрической вероятности нахождения любых точек встречающихся судов в областях, полученных от пересечения двух областей безопасного расхождения.

Навигационный риск равен нулю, если выполняется условие (9). Если траверзное расстояние (Дт) в относительном движении меньше, чем (9), то возникает навигационный риск, т. е. вероятность столкновения двух судов станет больше нуля:

$$Д_т \leq R_1 + R_2 + R_{пр\ 1} + R_{пр\ 2}, \qquad (10)$$

где R_1, R_2 – радиусы областей нахождения любых точек судов,

$R_{пр\ 1}$, $R_{пр\ 2}$ – радиусы областей прогнозов положения судов на время маневра.

Понятно, что при $Д_т \leq R_1 + R_2$ столкновение неизбежно.

В табл. 6 приведены значения максимального навигационного риска при уменьшении текущего траверсного расстояния $Д_{тк} = K\ Д_т$, где K = 0,2; 0,4; 0,6; 1,0.

Таблица 6. Значения навигационного риска при уменьшении траверзного расстояния

Значение коэффициента *K*	0,2	0,4	0,6	1,0
Вероятность попадания любой точки судна в опасный сектор	0,86	0,74	0,65	0,4
Вероятность столкновения (навигационный риск)	0,74	0,54	0,42	0,16

Таким образом, предложенный метод прогноза дистанций расхождения позволяет получить количественные значения навигационных рисков и учесть необходимое время маневра в условиях неопределенностей по положению любых точек расходящихся судов и неопределенностей относительной скорости расхождения. Результаты по определению областей безопасного расхождения подтверждаются методами экспертных оценок и методами интеллектуального анализа значительного экспериментального материала с использованием глубокого машинного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по формальной оценке безопасности (ФОБ) для использования в процессе принятий решений в ИМО. Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process. MSC/Circ.1023-MEPC/Circ.392. – СПб – Издательство: ЦНИИМФ, 2011 – 138 с.
2. Lee Hee-Jin, Furukawa Yoshitaka, Park Deuk-Jin. Seafarers awareness-based domain modelling in restricted areas. The Journal of Navigation, – 2021– Vol. 74, – Issue 5. – Pp. 1172–1188. DOI: https://doi.org/10.1017/S0373463321000394.
3. Rawson, A., Brito, M. Developing contextually aware ship domains using machine learning // The Journal of Navigation. – 2021. – No 74(3). – Pp. 515–532. doi:10.1017/S0373463321000047.
4. Вентцель Е. С., Л. А. Овчаров. Задачи и упражнения по теории вероятностей. – М.: КНОРУС, 2010. – 496 с.
5. Лагутин М. Б. Наглядная математическая статистика. М.: Лаборатория знания, 2022. – 472 с.
6. Хастли Т., Тибширани Р., Фридман Д. Основы статистического обучения. Интеллектуальный анализ данных, логический вывод и прогнозирование. – СПб.: Вильямс, 2020.– 768 с.
7. Некрасов С. Н., Прохоренков А. А. Комбинированный метод оценки навигационной безопасности при плавании по внутренним водным путям // Журнал университета водных коммуникаций. – 2011. – № 34. – С. 106–108.
8. Некрасов С. Н., Леденев Н. И. Применение обобщенной модели навигационных рисков кораблевождения в сложных навигационных условиях // Навигация и гидрография. – 2019. – № 55. – С. 14–22.

9. Некрасов С. Н., Леденев Н. И., Солощев А. Н. К вопросу о прогнозе риска столкновения кораблей в море // Навигация и гидрография. – 2019. – № 56.– С. 21–25.
10. Некрасов С. Н., Леденев Н. И. Комплексный ситуационный подход к оценке навигационной безопасности плавания // Навигация и гидрография. – 2019. – № 55. – С. 34–42.

MODERN METHODS OF IDENTIFICATION OF MODELS OF NAVIGATION SAFETY AREAS.

S. N. Nekrasov («GNINGI» JSC)

An overview of methods for estimating vessel divergence distances based on expert methods, methods of intelligent analysis based on random forests and methods based on the prediction of the mutual position of ships and the representation of the vessel in the form of an area characterizing the quality of management and the influence of natural marine conditions is given.

УДК 524.1+629.05

ДОСТИЖЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ В СВЕТЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ

А. П. СТЕПАНОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»»[1], Университет ИТМО)

Рассматриваются достижения ядерной физики и смежных прикладных областей науки и техники в свете возможности их применения для повышения помехоустойчивости, точности и автономности определения и уточнения местоположения подвижных объектов. Приводятся данные о существующих разработках и их применении. Рассматриваются вероятные перспективы развития данного направления.

Введение

Существующие с давних времён знания в области небесной механики и взаимодействиях материальных тел, а также открытые в XVIII–XX вв. явления (электромагнетизма – 1800-е гг.; квантовой теории строения вещества и принципа неопределённости в отношении поведения элементарных частиц вещества – 1900-е гг.; свойств вращающегося тела сохранять направление оси вращения в инерциальном пространстве – 1700–1800-е гг.; лазерного излучения – 1950-е гг.), создали фундаментальные основы и во многом указали путь для определения параметров движения объекта без необходимости частого наблюдения за небесными светилами и окружающими ориентирами, как в случае сочетания методов навигационного счисления и астронавигационного метода [1–3]. Созданный научно-практический задел положил начало новому методу и направлению в навигации – методу инерциального счисления, инерциальной навигации [1, 4–13]. О смыслах и терминологии в области инерциальной навигации как науки о способах выбора пути подвижного объекта, судна, говорят материалы и исследования [14–16], согласно

[1] Работа подготовлена автором инициативно вне связи с плановыми работами Концерна.

которым цель навигации как науки можно определить как сокращение области неопределённости местоположения судна при прохождении им своего пути.

Первичным источником информации для определения параметров движения судна и его местоположения методом инерциальной навигации являются инерциальные датчики: гироскопические (позволяющие установить факт наличия углового перемещения судна в инерциальном пространстве относительно неподвижных звёзд и определить его параметры) и акселерометрические (позволяющие установить факт наличия линейного ускорения перемещения судна в инерциальном пространстве и определить его параметры). О достижениях и разнообразии применяемых инерциальных датчиков можно судить по приведённому в работе [17] довольно детальному обзору, а также по данным из публикаций [1, 18–19], где, в частности, говорится о достижении в физической установке (разработка её велась около 40 лет) в космосе в условиях невесомости на основе криогенного гироскопа с неконтактным подвесом тяжёлого ротора из кварцевого стекла (Стэнфордский университет, США) дрейфа нулевого сигнала на уровне 10^{-11} °/ч. Вообразить такую величину можно, представив стрелку часов с длиной, равной радиусу Земли, которая, двигаясь непрерывно и равномерно в течение календарного года, опишет своим концом дугу на поверхности Земли, не превышающую длину десятой доли обычной шариковой ручки.

О наиболее точном из существующих и применяемых в навигационном приборостроении гироскопов – гироскопе с неконтактным подвесом бериллиевого ротора, электростатическом гироскопе (ЭСГ) – можно судить по работам [1, 17, 18, 20–22]. Анализ данных [21] позволяет отнести современные ЭСГ, например, созданные в США, к гироскопам уровня точности 10^{-5} °/ч. Проводятся работы (США, страны ЕС, Китай [23]) по созданию сверхточного гироскопического датчика на волнах материи с детектированием вращения посредством эффекта Саньяка, с уровнем остаточного дрейфа 10^{-6}–10^{-8} °/ч: гироскоп на основе атомного интерферометра cold atom (температура 10-6К) interferometry, CAI, в том числе, размещаемого на чипе [23–24] и конденсатах Бозе-Эйнштейна (Bose–Einstein Condensates (BEC), температура 10-9К) [17–18, 23]. Датчики на холодных атомах совершенствуются и уже применяются для научных исследований в космосе, а также в метрологии: достигнут уровень точности акселерометрических датчиков на холодных атомах порядка 1–10 мкГал [23], что в известной степени уже достаточно для измерений градиентов гравитационного поля Земли (ГПЗ), известен проект HYPER Европейского космического агентства (ESA) [23]. В работе [23] приводится так называемая технологическая дорожная карта (до 2025 г.) этапов ожидаемого развития технологий интерферометров на холодных атомах. Говоря о стремлении добиться в навигационном приборостроении уровня дрейфов гироскопов 10^{-6}–10^{-8}°/ч, следует отметить, что такая цель представляется недостижимой без соответствующего обеспечения из области фундаментальных наук, в частности, данных о фигуре Земли и параметрах её вращения [25–27].

Известно [1, 4, 5–6, 28–30], что погрешности определения местоположения судна при использовании метода инерциального счисления или счисления по данным магнитного компаса и измерителя путевой скорости неограниченно растут со временем. Несмотря на достижения и продолжающееся, пусть и относительно медленное, развитие элементной базы инерциального приборостроения, для удержания погрешностей определения местоположения в требуемых пределах необходимы внешние средства коррекции (далее – ВСРК).

1. Существующие средства коррекции инерциальных систем

В качестве таких средств применялись и применяются источники различных сигналов как естественного, так и искусственного происхождения [2–3, 30–33], а также информация о параметрах различных физических полей Земли [33–37].

Средства астрокоррекции

В отношении ВСРК по известным сигналам естественного происхождения можно отметить следующее. Начиная с 1950–1960-х годов для обеспечения коррекции навигационных систем кораблей и судов в любом районе Мирового океана применялись такие средства как радиосекстан [2–3], реализующие радиопеленгаторный принцип определения координат небесного светила и в последующем – координат местоположения судна [2–3]. Данные ВСРК, оперирующие с радиосигналами от Солнца и Луны, дополненные в последующем оптическим (навигация по звёздам) и радиоканалами (навигация по данным уже появившихся спутниковых радионавигационных систем (РНС)) обеспечивали на начальном этапе приемлемые точность (единицы и доли угловых минут (морских миль)) и вероятность проведения коррекции. В последующем в связи с возросшими требованиями точности местоопределения и скрытности требовались иные ВСРК [3]. До появления широкозонных РНС и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) радиосекстаны фактически являлись единственным средством уточнения местоположения в масштабах Мирового океана (рис. 1) [2–3].

Рис. 1. Проведение обсервации перископным радиосекстаном

Радионавигационные средства

С появлением в 1940–1960-х годах широкозонных РНС, в том числе Лоран-С (США) и Чайка (СССР), зона охвата была увеличена до нескольких тысяч километров от местонахождения опорных станций систем [33, 38]. В последующем с введением в эксплуатацию ГНСС: низкоорбитных Транзит (США) и Цикада (СССР), среднеорбитных НАВСТАР/GPS (США) и ГЛОНАСС (СССР/Россия) [31] интенсивность использования ВСРК резко возросла. Данный факт обусловлен высокой точностью позиционирования (погрешность порядка 10 м, менее 1 угл. с на поверхности Земли, или лучше при вероятности $P \approx 0{,}67$) и практической доступностью в любом районе Мирового океана [31–32]. При этом точность местоопределения, обеспечиваемая ГНСС, значительно превышает достигнутые в настоящее время результаты при реализации метода инерциального счисления даже с применением гироскопов типа ЭСГ.

О существующем состоянии ГНСС говорят данные Прикладного потребительского центра ГЛОНАСС [32], где указан состав навигационных спутников (НС) по состоянию на январь 2023 г. для существующих ГНСС (ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Galileo (страны Еврозоны), Beidou/Compass (Китай)). О вероятном существенном росте возможностей координатно-временного обеспечения зарубежных ГНСС могут говорить технические характеристики таких постоянно пополняемых низкоорбитных систем как Starlink [39–40] (произведено уже более 4000 спутников и планируется ~40000 аппаратов до 2030 г. [40]). Можно предположить, что ситуация с системами GPS и Starlink сейчас противоположна ситуации конца 1990-х годов, когда низкоорбитная Транзит (США) выводилась из эксплуатации [41]. Говоря о динамике развития РНС и их функциональных дополнений, целесообразно упомянуть и о других зарубежных системах космического базирования: Amazon Kuiper (~3000 спутников) и ряде других [23]. Однако, несмотря на совершенствование ГНСС (повышение помехоустойчивости при использовании антенн с синтезированной апертурой [31, 33], применение пространственной фильтрации сигналов ГНСС [31, 42]), практическое использование ГНСС сопряжено с воздействием множества естественных и преднамеренных помех [31, 33, 43]), наличие которых зачастую делает невозможным определение местоположения судна.

Таким образом, в отношении средств радиоастрокоррекции, радионавигационных систем на базе стационарных станций и орбитальных НС был пройден значительный по продолжительности и достигнутым результатам путь в 60 лет. Однако в силу специфики практического применения указанных ВСРК для снижения влияния преднамеренных помех, а также снижения зависимости решения навигационной задачи от приёма внешних сигналов ВСРК требовалась разработка иных способов уточнения местоположения, главным образом при навигации в Мировом океане и в воздушном пространстве.

Средства коррекции по физическим полям

К таким ВСРК относятся расположенные на судне средства, позволяющие по информации об определяемых ими параметрах различных геофизических полей (ГФП) [34–37] осуществлять уточнение местоположения объекта. Одним из наиболее употребляемых методов, реализующих навигацию по ГФП, является метод корреляционно-экстремальной навигации [34]. К ГФП относятся: магнитное, гравитационное, рельеф поверхности, оптическое, тепловое, радиолокационный контраст поверхности и др. [34, 44]. Помимо естественных физических полей, существующих в масштабах всей Земли, могут быть созданы искусственные физические поля в ограниченных областях пространства и времени. Источником таких полей могут быть маяковые системы: гидроакустические или радиоизотопные маяки [45] на дне или в приповерхностном слое [45–47], группы наземных радиомаяков [48] или на современном этапе – группы морских и воздушных необитаемых аппаратов. Для таких искусственных полей характерны проблемы из-за возможного наличия помех, особенностей распространения сигналов в среде. Определяющим критерием эффективности использования информации о ГФП является точность, с которой могут быть уточнены координаты судна, оцениваемые непрерывно методом инерциального счисления, и вероятность проведения коррекции. Точность определения координат местоположения по данным о ГФП или искусственно созданным физическим полям в значительной степени зависит от погрешностей определения параметров данного

конкретного поля и уровня градиента изменения потенциала этого поля [34–35]. Важна также стабильность параметров ГФП во времени, что ярко проявляется, например, в случае применения магнитного поля Земли для уточнения местоположения [33, 34, 49].

Говоря о пространственной изменчивости ГФП для случая гравитационного и теплового полей Земли можно отметить, что [36, 50] изменчивость ГПЗ, определяемая главным образом его аномалиями, не столь существенна (на 80% поверхности Мирового океана изменчивость ГПЗ невысока) для решения задачи навигации в масштабах Мирового океана. Детектором ГПЗ может выступать гравиметр либо гравитационный градиентометр [23, 36, 50]. К особенностям теплового поля Земли можно отнести то, что оно также имеет определённую пространственную изменчивость, в том числе в Мировом океане и на достаточно больших глубинах. О характере градиента температурного поля Мирового океана говорят исследования в рамках программы АМИГО (Арго-модели исследования глобального океана) [51–52] глобального эксперимента Арго [53–57] (Арго – один из центральных элементов Глобальной системы наблюдений за океаном с расширяющимся спектром возможностей [56]). В работе [51] приведены примеры теплового поля в рамках модели АМИГО на глубинах ~2000 м. На рис. 2 приведена условная схема организации интерфейса взаимодействия по линии буй – наземная станция (сеть Арго содержит тысячи свободно плавающих буёв [56–57]). Детектором в данном случае могут выступать соответствующие термометрические датчики, находящиеся как на самом судне, так и вне его.

Приведённые в статье [51] результаты говорят о слабых градиентах изменения температуры в толще воды. В то же время полученные [51] результаты свидетельствуют о нагреве всей массы Земной тверди изнутри, причём на долю Мирового океана приходится до 90 % всего тепловыделения Земли [57]. Суммарная энергия тепловыделения в Мировом океане, полученная по данным эксперимента Арго, превосходит величину 300 ТВт [57–58]. Не столь существенная для решения задачи навигации изменчивость температурного поля в Мировом океане может быть следствием того, что имеют место явления кондукции и конвекции при передаче энергии от источников к поверхности Земли [59]. О градиентах температурного поля внутри Земли говорят результаты исследований [59] (рис. 3).

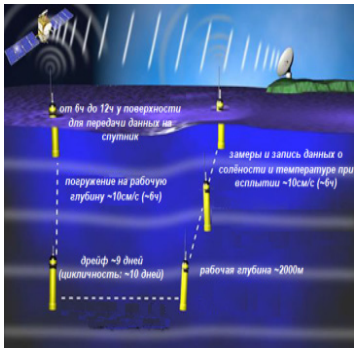


Рис. 2. Буи системы Арго (один из буёв Арго с диаграммой его функционирования изображён в толще воды)

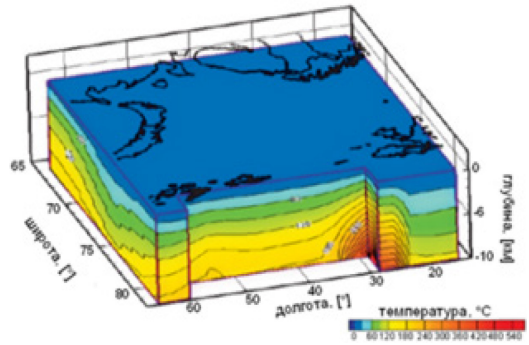


Рис. 3. 3D-геотемпературная модель земной коры Баренцева моря, вид с севера [59]

Согласно проведённым исследованиям [53, 54, 57–61] идущее из недр Земли тепло в основном имеет радиогенную природу [60–62], при этом основная доля энергии приходится на реакцию распада изотопа ^{40}K [57, 62]. Данный фундаментальный результат – поток энергии из недр Земли более 300 ТВт [57–59] – предсказывает модель строения Земли, представленная в работах [63–64], согласующаяся также с явлениями, данные о которых приводятся в исследованиях [65–66]. В этом свете интересны также исследования [67]. Одним из основных непосредственно доступных для изучения «переносчиков» энергии в указанном радиогенном процессе является релятивистская частица нейтрино [57, 62] (или нейтрончик, согласно названию, данному ей Э. Ферми в 1930-е гг.), которая была названа по наименованию места её рождения – геонейтрино. Таким образом, минуя явления конвекции и кондукции, появляется некий «транспортный агент», позволяющий получать информацию непосредственно из области осуществления энергетических превращений в недрах Земли. Учитывая интенсивность теплового потока из недр Земли, неравномерность её строения [57, 59, 63], можно предполагать наличие градиентов, более существенных, нежели температурного поля в Мировом океане, что открывает новые возможности для осуществления навигации.

Касательно особенностей существующих ВСРК можно заключить, что существующие ВСРК в реальных условиях эксплуатации допускают лишь эпизодическое применение для уточнения местоположения, а использование инерциальных навигационных систем и метода инерциального счисления при непрерывном счислении пути в настоящее время пока безальтернативно по критерию точность/темп обновляемости данных. Накопленный практический опыт применения различных ВСРК показывает, что для достижения качественно нового уровня следует изыскивать новые возможности и пути, опираясь на новые способы установления параметров уже известных физических явлений и новые физические явления. В качестве таких путей видятся использование информации о свойствах релятивистских частиц, атомных и ядерных процессов, применение сравнительно недавно открытых новых физических явлений. Об этом далее пойдёт речь.

2. О возможности осуществления навигации с помощью релятивистских частиц

Из теории релятивистских частиц

Предваряя дальнейшее изложение, следует отметить, что здесь и далее под релятивистскими элементарными частицами понимаются элементарные частицы, относящиеся к лептонам (частицам, имеющим спин $\frac{1}{2}h/2\pi$, где h – постоянная Планка), взаимодействующие с веществом только в рамках слабого и/или электромагнитного взаимодействия (открыты четыре вида взаимодействия: сильное, слабое, гравитационное, электромагнитное) [68], например: нейтрино разных типов; мюоны, составляющие основу материи и движущиеся со скоростями, близкими к скорости света в вакууме [68], которые отличаются практически прямолинейным движением. Охарактеризовать вероятность взаимодействия частицы в микромире (при сильном и слабом взаимодействии) можно через величину полного эффективного сечения такого взаимодействия или просто – эффективного сечения взаимодействия [68–69]. В работах 2000-х гг. [69–70] приводится упрощённая в известной степени формула определения вероятности взаимодействия частицы с веществом (под вероятностью

понимается отношение числа провзаимодействовавших с веществом частиц к общему числу пучка частиц, пришедших в вещество):

$$\omega = \sigma n L \,, \tag{1}$$

где σ – эффективное сечение взаимодействия, см^2, n – плотность атомных ядер в мишени, которая облучается пучком частиц, 1/см^3, L – длина мишени, см. Для сильного и слабого взаимодействия приводятся значения σ: ~10^{-24} см^2 (что приблизительно соответствует геометрическому сечению атома) и ~10^{-43} см^2 соответственно. Анализируя их, можно оценить вероятность обнаружения N частиц в рамках существовавших на 2000 г. представлений о протекании слабых взаимодействий в веществе при облучении мишени пучком N_0 частиц. Эффективное сечение взаимодействия σ в значительной степени зависит от энергии приходящих в мишень частиц в пучке и от массы ядер атомов вещества мишени [68, 71]. Следует подчеркнуть, что жизнь в микромире также подчинена законам сохранения: энергии, импульса, а также, что характерно для микромира – сохранения спина – углового момента, момента количества движения частицы, выражаемого в долях постоянной Планка [68, 70, 72]. Для частиц микромира также характерно условное деление их на стабильные – живущие долго или бесконечно долго (например – нейтрино) до момента их распада, т. е. преобразования в другие, более стабильные частицы как объекта микромира [68, 72] и нестабильные – живущие ограниченное время (например – мюоны) до момента их распада [68, 72]. Стабильность частиц определяет возможности их наблюдения на некотором удалении от места их зарождения [68, 73–74]. Согласно работе [68] для нестабильных релятивистских частиц среднее время жизни τ, например, мюона и длина его пути до распада $L_{\text{расп}}$ в лабораторной системе (не связанной с системой покоя, с частицей, а связанной с наблюдателем, см. например [72, 75]) зависит от его полной энергии (сумма кинетической энергии и энергии, обусловленной массой покоя) [68, 70]. Среднее время жизни частицы и её полная энергия определяются следующими соотношениями:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\tau_0 E}{m_\mu c^2} \,, \tag{2}$$

где τ_0 – время жизни мюона в системе покоя, с, $\beta = \frac{\upsilon}{c}$ (υ – скорость частицы в лабораторной системе координат, [м/с]), m_μ – масса покоя мюона, кг, E – полная энергия частицы, эВ (для справки (авт.): единица измерения [эВ] – это энергия покоя электрона в [Дж], 1эВ ≈ 1,6·10^{-19} Дж, принятая за условную единицу [68]) и

$$L_{\text{расп}} = \upsilon\tau = \beta c \tau = \frac{\tau_0 \beta c E}{m_\mu c^2} \,. \tag{3}$$

Например, при $\beta \approx 0{,}9999999$ [73], $E = 2$ГэВ [72] время жизни мюона ($\tau_0 \approx 2{,}2 \cdot 10^{-6}$ с) в лабораторной системе будет $\tau \approx 42$, мкс, и длина его пути составит величину порядка $L_{\text{расп}} \approx 12500$, м (без учёта потерь на ионизацию на пути следования мюона [68]). Ввиду особенностей поведения субатомных частиц, поведение которых принципиально описывается известными фундаментальными стохастическими соотношениями – уравнение Шрёдингера-Робертсона [76–77] – и анализ которых производится на ансамблях частиц [68, 72–73, 75] далее под частицей будем понимать именно ансамбль релятивистских частиц. Различают поколения частиц, определяемые их стабильностью и энергией, затрачиваемой на образование частиц, также различают первичные и вторичные частицы одного поколения [68]. Сделав это краткое, но необходимое отступление, которое пригодится в дальнейшем, продолжим.

Немного истории

Предложения по использованию релятивистских элементарных частиц для решения задач связи и навигации с подводными объектами, а также соответствующие прикладные работы проводились за рубежом в том числе при руководстве Управления НИОКР ВМС США [45] уже с конца 1970-х гг. Источники частиц для задач навигации могут быть как естественного происхождения (исходящие из недр Земли, например геонейтрино, см. раздел 1, космические источники [45]), так и искусственного происхождения – от ускорителей элементарных частиц [45]. В 1995 г. в России выдвинуто предположение [45] о том, что нейтрино естественного происхождения будут малопригодны для целей навигации ввиду их крайне слабого взаимодействия с веществом (см. (1)) при их малой энергии – порядка 1МэВ (это полная энергия частицы [70]), в отличие от частиц, полученных на ускорителях, где энергии частиц в пучке могут достигать десятков ГэВ [45, 78]. О некоторых исторических перипетиях создания ускорительной техники приводятся сведения в монографии [79]. По рассматриваемой тематике применения уже релятивистских нейтрино для осуществления связи и навигации известны материалы о проведении или планировании соответствующих экспериментов: по приёму нейтринных сигналов на расстоянии до 3000 км от ускорителя элементарных частиц [45], разработке подводного «телескопа» нейтрино (проект «ДЮМАНД») на глубине 4–5 км, создание ускорительно-накопительного комплекса в районе г. Серпухова с регистрацией нейтринных потоков в озере Байкал [4], о натурных экспериментах с передачей информации с помощью нейтрино лабораторией им. Э. Ферми (США, FERMILAB, около 2012г.) в рамках тематик MINERνA и NuMI [80]. О практическом интересе в отношении применения нейтрино для решения задачи навигации свидетельствуют в том числе публикации 2011 г. [81]. В статье [45] в 1995 г. в отношении проводимых в СССР работ до его распада отмечается, что тогда из-за финансовых трудностей завершение их затягивалось. Здесь хочется добавить, что не столько из-за финансовых трудностей, сколько из-за общего состояния дел, о котором наглядно свидетельствует отчёт «Preliminary Assessment of Novel RF Linear Acceleration Structures Developed in The Former Soviet Union», подготовленный по результатам посещения уже бывшего СССР в 1994 г. представителями корпорации Grumman, армии США, Лос-Аламосской национальной лаборатории, Лоуренс-Берклей лаборатории [82]. Отчёт подготовлен

для командования армии США и стратегической обороны и посвящён созданному в СССР уникальному ускорителю протонов линейному на обратной волне (УЛОВ).

Возможные пути решения задачи уточнения координат места

Анализ информации в открытых источниках по данной тематике [45, 57–58, 62, 65, 71–73, 78–80, 81, 83–111] позволяет выделить вероятные пути решения задачи, по некоторым из которых в мире активно проводятся исследования [73, 105–106].

Рассмотрим далее в качестве первичного носителя информации для уточнения координат места релятивистские или околорелятивистские частицы [45, 62, 65, 72, 80–81, 104–105]: нейтрино и мюоны. В качестве возможных источников таких частиц могут выступать [45, 57–58, 62, 65, 73, 80, 104]: недра Земли (геонейтрино), космические лучи (нейтрино, мюоны), ускорители частиц или энергетические установки (нейтрино, мюоны).

Функцию ускорителей частиц или энергетических установок [79, 84, 87, 90–93, 99–100, 103, 107–108, 110–111] могут выполнять: а) малогабаритные ускорители, построенные по схеме ускорителей протонов на обратной волне (так называемые УЛОВ, BWLAP [79, 83, 92–93]); б) сверхмалогабаритные ускорители, основанные на облучении лазерным излучением (от маломощных до пентаваттных лазеров) тонкостенных мишеней [90–91], которые могут получать питание от сравнительно малогабаритных энергетических установок, построенных по схеме ядерной релятивистской технологии (ЯРТ [79, 92–93]) или по схеме, использующей механизм когерентных коррелированных состояний (ККС, [96, 98–103, 109]), порождаемых в различных средах при различном воздействии [95–97, 99–100, 103, 112–114], механизма мюонного катализа и других [88, 115]. О некоторых других особенностях, связанных с возможной реализацией навигации с помощью релятивистских частиц, в том числе о детекторах частиц (нейтрино и мюонов), о вероятном решении задачи навигации с помощью нового физического явления – тепловой волны [95, 99–100], пойдёт речь далее.

2.1 О навигации с помощью геонейтрино

Частица нейтрино известна ещё с 1930-х гг., когда предположение о существовании нейтрино как продукте бета-распада сделал В. Паули [70], однако обнаружена она была лишь в 1956 г. Источником нейтрино могут быть как реакции спонтанного распада радиоактивных элементов, так и реакции, вызванные процессами взаимодействия различных элементарных частиц [57, 68, 80]. Происходящие в теле Земли интенсивные радиогенные процессы [57, 62–63, 65, 68, 116–117] (а тепловыделение в масштабах Земли составляет более 300Т Вт, что установлено и подтверждается рядом исследований [53–54, 57, 62–63, 65, 116–117]) (см. также раздел 1) приводят к образованию так называемого электронного антинейтрино, получившего название геонейтрино, по месту рождения (кроме него существуют также мюонное и таонное нейтрино) [57, 68]. Здесь можно отметить, что данный тип, но уже не нейтрино, а антинейтрино, является одним из основных продуктов реакции на ядерных энергетических станциях [71]. Как уже было отмечено ранее, исходя из решения задачи навигации, сечение взаимодействия частицы нейтрино с веществом крайне мало [45], что в известной степени затрудняет его регистрацию. Так в работах [57, 68, 80, 118] приведены данные об энергетическом спектре нейтрино разного происхождения и данные о сечениях взаимодействия (рис. 4, 5).

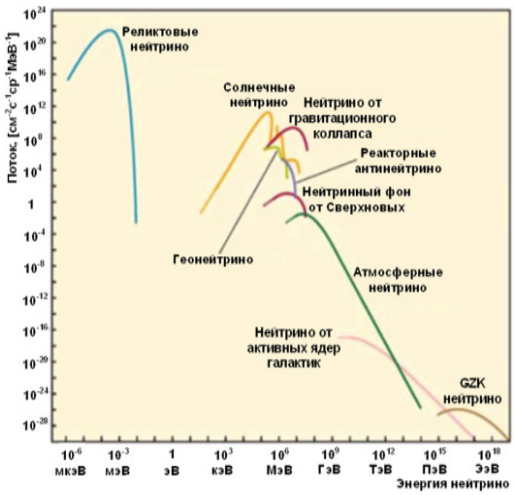


Рис. 4. Спектр нейтрино различного происхождения (здесь ср – телесный угол) [67]

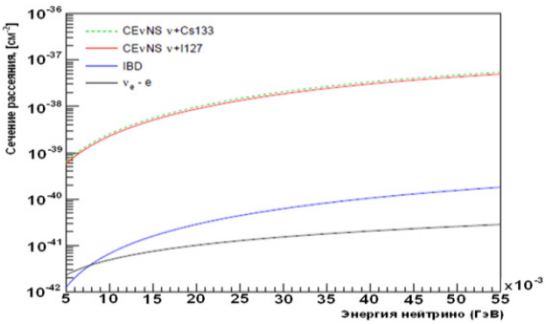


Рис. 5. Сечение реакции нейтрино как функции энергии нейтрино для ^{133}Cs (зел. пунктир) и ^{127}I (красн.) для процесса CEνNS. Показаны инверсный β-распад (IBD) (син.), и рассеяние нейтрино на электроне (ν_e – e) (чёрн.), сечения получены по данным GENIE [79]

Принимая во внимание поток геонейтрино (рис. 4) – порядка 10^8 [частиц/см^2/с/ср/МэВ] и значение сечения взаимодействия (cross section) ~10^{-43} см^2 можно видеть, что вероятность (см. выраженте (1)) регистрации частицы крайне мала. Здесь под сечением взаимодействия понимается сечение при упругом рассеянии нейтрино на электронах мишени и обратном β-распаде [119], графики на рис. 5. Для надёжной регистрации частицы при таком сечении взаимодействия нужны огромные массы вещества, как это имеет место в ряде существующих нейтринных детекторов в разных странах мира: России (Баксанская станция, детектор на оз. Байкал), США (Ice Cube), Японии (KamLAND), Италии (BOREXINO) и ряде других.

Как видно из публикаций [57, 68, 119], существующие детекторы нейтрино (детектирование фотонов от взаимодействия нейтрино по схемам упругого рассеяния нейтрино на электронах мишени и обратного β-распада [119]) представляют собой физические установки и практически не пригодны для решения задачи навигации. Однако открытое в 2015 г. явление осцилляций нейтрино: превращение нейтрино одного поколения в нейтрино другого поколения (типа) [120], доказывающее, что у нейтрино есть масса, позволило затем в 2015–2016 гг. экспериментально установить и подтвердить (эксперимент COHERENT: Окк-Риджская лаборатория (США), МИФИ (Россия) и др. – более 4 стран и 80 участников [80, 121]) предсказанное в 1974 г. явление упругого когерентного рассеяния нейтрино (УКРН) на тяжёлых ядрах атомов (Coherent elastic neutrino-nucleus scattering, CEνNS), что позволяет существенно повысить вероятность регистрации частицы (рис. 5) при использовании для этой цели атомов с тяжёлыми ядрами, например, ксенона, цезия, йода. Для такого взаимодействия частицы с мишенью сечение взаимодействия определяется соотношением [71]:

$$\sigma \approx 0{,}4 \cdot 10^{-44} A^2 E_\nu^{\ 2}, \text{ см}^2, \qquad (4)$$

где A – число нейтронов атомного ядра мишени, E_ν – энергия нейтрино, МэВ (справедливо при энергиях нейтрино до 50 МэВ [67]). Для сравнения приведём массы покоя нейтрино разных типов [120]: электронное нейтрино – менее $2 \cdot 10^{-6}$ МэВ/с^2 (c – скорость света в вакууме), мюонное нейтрино – 0,2 МэВ/с^2, таонное нейтрино – 18 МэВ/с^2 (для справки (авт.): ~0,5 МэВ/с^2 – масса покоя электрона). Созданный для задачи регистрации нейтрино детектор на жидком ксеноне [71, 121] уже обладает приемлемыми для решения задачи навигации габаритами (размер самого детектора порядка ∅700x1700 мм с ~240 кг жидкого ксенона). Однако, как будет показано далее в разделе 2.2, интенсивности потока геонейтрино оказывается недостаточно для его надёжной регистрации за приемлемое время даже с помощью нового детектора на основе эффекта УКРН.

2.2 О навигации с помощью ускорительных нейтрино

Ранее приводились сведения о том, что в 1995 г. в качестве источников нейтрино [45] рассматривались ускорители элементарных частиц. Однако и тогда, и десятилетия после ускорители являли собой громоздкие энергоёмкие физические установки, что затрудняло их использование в целях осуществления навигации. Вероятно, в связи с этим в 2011 г. рассматривались варианты использования так называемых солнечных нейтрино (рис. 4), когда предполагалось фиксировать угол прихода частицы и соответствующим образом определять время её прихода в детектор [81]. Если говорить о методе, то он подобен методу определения координат при наблюдении за Солнцем с помощью радиосекстана (см. раздел 1). Однако данный вариант также малопригоден для навигации в силу недостаточной интенсивности потока солнечных нейтрино (порядка 10^{12}, частиц/см^2/с/ср/МэВ) (рис. 4), что будет освещено далее, и существенной зависимости потока от зенитного угла (между направлением на Солнце и местный зенит) [80]. Наглядное представление о том, что есть поток частиц (или так называемые ливни частиц – преобразование первичных частиц во вторичные и также переход поколений частиц одного в другое) даёт схематическое изображение в работе [68] (рис. 6).

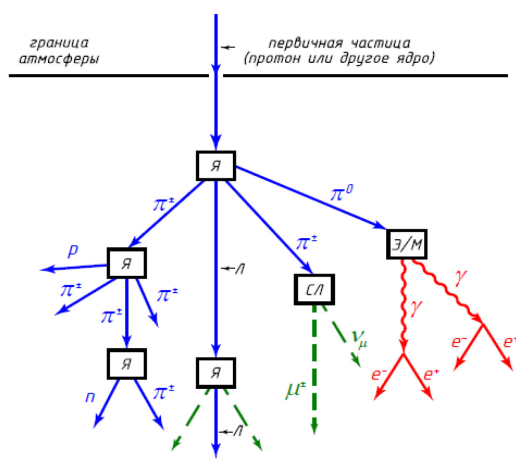


Рис. 6. Качественная схема взаимодействия протона космических лучей с ядрами в земной атмосфере: Л – лидирующая частица; Я – ядерное взаимодействие; Э/М – электромагнитное; СЛ – слабое [64]

В настоящее время, вероятно, в связи с развитием ускорительной техники [78–79, 83, 84–85, 87–93] и с проблемой доступности ГНСС из-за различного рода помех (см. раздел 1) появились работы, посвящённые возможности решения задачи коррекции инерциальной навигационной системы с помощью создания ВСРК с применением мюонных нейтрино, рождающихся в результате распада мюонов [68, 72, 75, 80, 105–106, 120]. В работах [80, 105] рассматривается решение задачи уточнения координат места с помощью нейтрино (нейтрино навигации, «neutrinos PNT»). Методом полунатурного моделирования, где в качестве исходных данных применялись данные о параметрах потока мюонного нейтрино, генерируемого существующим протонным ускорителем типа DAEδDALUS, ESSnuSB (направленный поток в секторе при не менее $4 * 10^{22}$ частиц/год на выходе установки) показано [80], что для практического решения задачи уточнения местоположения необходим источник нейтрино, дающий в некотором конусе изотропный поток нейтрино порядка $3{,}8 \cdot 10^{25}$ частиц/год. В работе [80] предполагается, что разрабатываемые новые ускорители, в том числе перемещаемые, будут способны обеспечить требуемый поток нейтрино при достижении необходимых физических размеров и экономической целесообразности. В качестве граничных условий при исследованиях предполагалось размещение генераторов нейтрино на удалении не более 1000 км друг от друга, например, в бассейне Средиземного моря согласно предложенной в публикации [105] схеме. Такая дальность достижима ввиду стабильности нейтрино, не считая осцилляций [122]. В работах [80, 105] показано, что при следующих условиях:

– предлагаемом в работе размещении генераторов нейтрино,

– применении модуляции потока нейтрино (для выделения сигнала на фоне шума и опознавания источника нейтрино) за счёт изменения времени излучения и его длительности (время-пролётный метод, ranging windows algorithm [105]),

– синхронизации детектора и генераторов нейтрино с погрешностью порядка 1мкс или лучше [80],

– применении детектора нейтрино, массой порядка 500 т (рабочее вещество кристаллы CsI [80]) при условии детектирования нейтрино по схеме УКРН,

– при наборе определённой статистики на детекторах нейтрино

возможно достижение точности определения координат места порядка 3000 м (с вероятностью P=0,997). Достигаемое при этом минимальное время между последовательным проведением уточнения местоположения составляет величину порядка 3,6 часа (из-за необходимости обработки данных детектора нейтрино), когда на детекторе в течение указанного времени регистрируются всего несколько частиц, о чём можно судить по данным [80] (рис. 7).

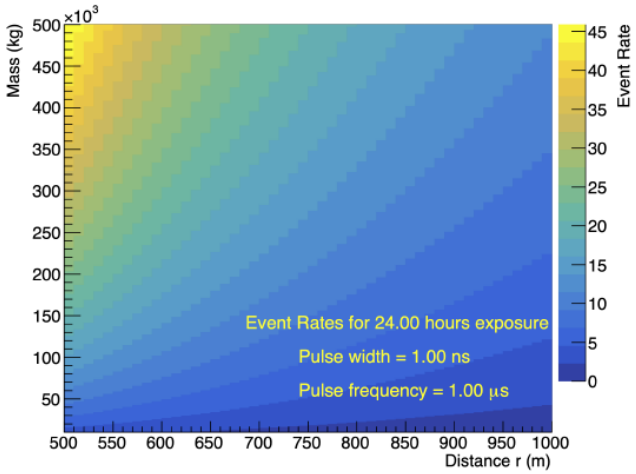


Рис. 7. 2D распределение событий в течение 24 ч при ширине импульса 1 нс и частоте импульсов 1 мкс как функция дальности до источника и массы вещества детектора (в диапазоне масс вещества детектора $5x10^2$ – $5x10^3$ кг, дальностей: $5x10^2$ – $10x10^2$ м число событий достигает ~45)

Можно предположить, что при соответствующих возможностях генератора нейтрино возможна энергетическая модуляция потока частиц (изменение энергии частиц). В работе [80] делается предположение, что указанный минимальный порог ($3{,}8\cdot10^{25}$ частиц/год) может быть существенно превышен создаваемыми перспективными ускорителями частиц, принимая во внимание то, что ядерный реактор может производить ненаправленный поток порядка $6\cdot10^{29}$ частиц/год (в основном электронные антинейтрино) [80, 105]. Очевидным в силу (4) является также возможность повышения количества регистрируемых частиц при увеличении энергии пучка нейтрино, выходящих из ускорителя. Отмечается [80], что росту числа регистрируемых частиц может служить так называемая фокусировка потока нейтрино путём организации совместной работы рядом располагаемых ускорителей.

Относительно детектора нейтрино можно отметить, что рассматриваемый вариант [80] на основе кристаллов CsI представляется менее чувствительным, чем двухфазный (жидкая и газовые фазы) детектор на основе ксенона РЭД-100 [71, 121]. Достоинством детектора на кристаллах, как можно судить по имеющимся данным, является, например, практическое отсутствие чувствительности к линейным ускорениям, чего нельзя сказать о детекторе с жидкой фазой вещества, вступающего во взаимодействие с нейтрино. Так, по словам разработчиков детектора РЭД-100 при его эксплуатации на подвижном основании важно добиться горизонтального положения границы раздела жидкой и газовой фазы в поле силы тяжести. Относительно детектора нейтрино на кристаллическом веществе отмечается [80], что вместо детекторов на основе фотоумножительных трубок (Photomultiplier Tubes (PMTs)), применявшихся в эксперименте COHERENT [121], предлагается использовать разработанные кремниевые фотоумножители (Silicon Photomultipliers/Multi-Pixel Photon Counters (SiPMs/MPPCs)), позволяющие создавать малогабаритные пространственные структуры. Такого рода кремниевые детекторы уже выпускаются серийно и имеют высокую чувствительность. По данным публикаций [123–126] в рамках проекта CosmicWatch в Массачусетском

технологическом институте (MIT, США) в 2010-е гг. был разработан сверхмалогабаритный детектор космических мюонов, основой которого является SiPMs производства SensL (Ирландия, США), позволяющий проводить исследования в реальном времени.

В работе [80] указывается на то, что в предлагаемой архитектуре системы навигации с помощью мюонных нейтрино (рис. 8), немаловажным является вопрос синхронизации в рамках единой системы источников и детекторов нейтрино. В отношении временного обеспечения данной задачи следует обратить внимание на следующий факт. Согласно докладу, сделанному в Стенфордском Университете (США) [127], DARPA и ряд организаций США вели разработки по различным тематикам, включая программу μPNT (3D сборка с микромеханическими инерциальными датчиками и атомными часами на цезии Cs и программу CSAC (создание миниатюрных атомных часов реального времени) (см. также работу [23]). Как можно судить по данным источника [128] компанией Microsemi (США) [128] были разработаны и производятся миниатюрные часы на атомах Cs. Вероятно, такие часы при сопряжении с фотоприёмниками типа SiPMs могут позволить повысить разрешающую способность детектора нейтрино в целом.

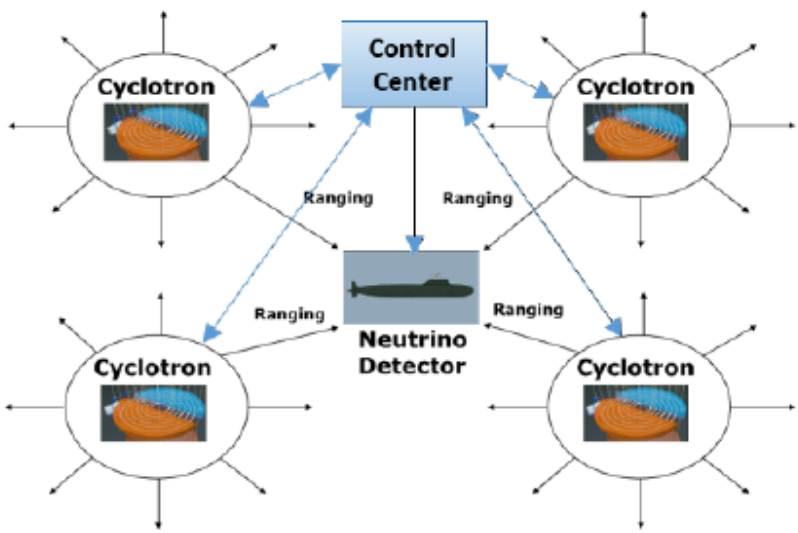


Рис. 8. Концепция архитектуры системы навигации с помощью нейтрино [80]

Вопрос об источниках нейтрино, позволяющих при приемлемых эксплуатационных показателях обеспечить требования системы навигации, будет рассмотрен в разделе 4, прогноз о достижении требуемых характеристик дан в работе [80]. Завершая рассмотрение свойств системы навигации с помощью мюонного нейтрино, можно отметить технологическую дорожную карту развития нейтринной навигации (до 2030 г., программа POSITRINO) [105–106], реализуемую в настоящее время. В качестве вероятного «побочного» продукта данной программы можно предположить создание пассивной системы слежения за носителями ядерных энергетических установок (ЯЭУ), как это имеет место с системой мониторинга АЭС [71, 129], аналогично системе наблюдения за подводными объектами по акустическому шуму SOSUS [130].

2.3 О навигации с помощью мюонов

Свойства мюонов

Приведём некоторые сведения о свойствах этих частиц.

Мюоны – это субатомные заряженные релятивистские (в момент их зарождения) частицы, относящиеся к лептонам (дробный спин s=1/2), открытые в 1936 г. Это самые долгоживущие частицы среди нестабильных частиц, имеющие физические параметры [68, 72, 75]: масса покоя $m_\mu = 206{,}77 m_e = 0{,}1126 m_p$, гиромагнитное отношение $\gamma_\mu = e / m_\mu c = 13{,}5544$ кГц/Гс, время жизни в системе покоя $\tau_0 \approx 2{,}2 \cdot 10^{-6}$ с. Рождение естественных космических мюонов происходит единственным образом при распаде положительных и отрицательных π-мезонов (пионов) (их время жизни в системе покоя составляет порядка ~10^{-8}с) [68, 72, 75]:

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu, \ \pi^- \to \mu^- + \tilde{\nu}_\mu, \tag{5}$$

где π^+ – положительный π-мезон (пион), μ^+ – положительный мюон , ν_μ – мюонное нейтрино ($\tilde{\nu}_\mu$ – мюонное антинейтрино). В дальнейшем мюоны распадаются, а нейтрино, являясь стабильными частицами, могут рассеиваться на нуклонах – протонах и нейтронах – атомов, вступать с ними во взаимодействие с образованием уже вторичных мюонов и нуклонов [68]. Рассеяние нейтрино при этом имеет сечение порядка ~10^{-38} см^2, аналогично сечению при взаимодействии по схеме УКРН с детектором на CsI (рис. 5), причём сечение возрастает линейно с ростом энергии нейтрино [68]. Как отмечается в работе [68], естественные мюоны порождаются космическим лучами при их взаимодействии с атмосферой Земли и являются частью «ливней частиц» (вторичных частиц) (рис. 6), составляют наиболее жёсткий их спектр и зарождаются в атмосфере на высотах порядка 10000–20000 м, где достигается наибольшая плотность потока мюонов (порядка ~10^6/см^2/с/ср). Мюоны достигают поверхности Земли и Мирового океана в гораздо меньшем количестве (плотность потока порядка ~200 частиц/см^2/с/ср [68]), чем их образуется в атмосфере. Это происходит главным образом из-за спонтанного распада и потерь энергии на ионизацию вещества (преодоление потенциала ионизации электронов среды составляет, как правило, порядка 10-20 эВ) атмосферы Земли и её недр [68], и их распространение в связи с этим сильно зависит от зенитного угла. Потери энергии мюона на ионизацию вдоль пути мюона могут составлять порядка 10–100 МэВ на каждый сантиметр пути, пройденного мюоном в веществе [68, 75]. При энергии порядка 100 МэВ пробег мюона в большинстве веществ составит величину порядка 30–45 г/см^2 – столбика вещества с высотой, равной соответствующей длине свободного пробега, до распада [68] (порядка 0,3 м в воде). Из-за потерь на ионизацию падает и скорость мюонов, что приводит согласно выражениям (2) – (3) к сокращению длины пути частицы до её распада.

В публикациях [72, 75] приводятся данные о том, что замечательным явлением при образовании мюонов, например положительных, является их 100 %-я поляризация, т. е. одинаковая ориентация спина (углового момента) мюонов при их образовании. Другим замечательным явлением, определившим применение мюонов в

практической области, о чём речь пойдёт далее, является следующее: поскольку они участвуют в слабом взаимодействии [68, 72, 75], когда наблюдается несохранение чётности при распаде мюона [68], то появляется возможность определять структуру вещества мишени и самой мишени с учётом того факта, что мюон, взаимодействуя с магнитным полем вещества на атомарном уровне посредством своего магнитного момента [68, 72, 75], изменяет поляризацию своего спина по величине (количество поляризованных мюонов в отношении к общему их числу) и направлению в пространстве, а с направлением его спина связано направление движения вторичных частиц при распаде мюона, которые и регистрируются.

Здесь и далее под мюоном следует понимать ансамбль мюонов как частиц. Одно из свойств мюонов – самое длительное время жизни среди нестабильных релятивистских частиц (для справки (авт.): время жизни нейтронов, которые не относятся к релятивистским частицам, составляет порядка ~900 с [68]). При их практическом применении длительность существования является естественным источником фильтрации или сепарации мюонов на фоне других релятивистских частиц [68]. Помимо существования естественных, космических, мюонов они могут порождаться ускорителями протонов при бомбардировке такими протонами соответствующих мишеней [68]. После того, как завершится жизненный путь мюона, когда в системе координат покоя частицы истечёт, в среднем по ансамблю частиц, время $\tau_0 \approx 2{,}2 \cdot 10^{-6}$ с (см. раздел 1), он подвергается распаду по следующей схеме [68, 72, 75]:

$$\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_\mu,\ \mu^- \to e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu, \tag{6}$$

где e^+ – позитрон (стабильная частица; e^- – электрон, стабильная частица), ν_e – электронное нейтрино ($\tilde{\nu}_e$ – электронное антинейтрино), $\tilde{\nu}_\mu$ – мюонное антинейтрино. Здесь следует отметить, что образовавшиеся в соответствии с реакциями (5) – (6) мюонные нейтрино могут вступать в последеющем в реакции с нуклонами [68]:

$$\nu_\mu + n \to \mu^- + p\ ,\ \tilde{\nu}_\mu + p \to \mu^+ + n\ , \tag{7}$$

где p, n – протон и нейтрон соответсвенно. При этом в случае реакции $\nu_\mu + n \to \mu^- + p$ «разлёт» образовавшихся мюонов происходит изотропно, т. е. мюоны могут двигаться в том числе и в направлении, обратном направлению движения налетающего мюонного нейтрино, чего нет в реакции $\tilde{\nu}_\mu + p \to \mu^+ + n$.

Учитывая реакции (5) – (7), к особым замечательным свойствам мюонов, которые могут быть полезны в практике работы с ними, следует отнести также возможность образования отрицательным мюоном мезоатомов (с изотопами водорода) и мезомолекул (с дейтерием и др.) без его поглощения ядром атома с последующим осуществлением ядерных превращений, сопровождающихся выделением огромной энергии [88, 120, 131–132]. Такие превращения, как представляется, могут «восполнять» потери энергии при образовании вторичных частиц, что открывает некоторые возможности для их применения в решении задачи

навигации. Завершая описание свойств мюонов, целесообразным представляется предположить следующее. В разделе 2.2, где речь шла о навигации с помощью ускорительных нейтрино, рассматривался механизм регистрации нейтрино. Опираясь на указанные факты о мюонах, можно предположить, что мюонные нейтрино, взаимодействуя с детектором или веществом среды на некотором удалении от детектора по схеме (7), могут порождать мюоны меньших энергий, которые с учётом потерь на ионизацию, могут с большей вероятностью регистрироваться в комбинированном детекторе, одновременно регистрирующем как нейтрино, так и вторичные мюоны. Представляется также, что при больших удалениях от места зарождения первичных мюонов наиболее вероятным является наблюдение мюонов при их распаде, чем при их рассеянии с сечением порядка ~10^{-28} см^2 [133].

Мюонография

В отличие от нейтрино, регистрация которых крайне затруднена, и практическое использование которых, можно сказать, только началось [121], в отношении мюонов дело обстоит несколько иначе. Описанные ранее свойства и особенности мюонов широко используются в практических исследованиях свойств веществ и материи начиная с 1960-х гг. при работе с космическими мюонами. Согласно источникам [68, 72, 75] существуют методы исследования вещества, получившие в зарубежной литературе общее название μSR (SR: Spin Rotation, Relaxation, Resonanse). В работе [68] приводятся сведения о том, что мюонный метод исследования вещества в СССР начал развиваться в ПИАФ АН СССР (ныне РАН) после 1976 г. Согласно имеющимся данным в современных исследовательких и практических целях мюоны уже применяются (космические мюоны, мюоны из недр Земли) или стали применяться (мюоны ускорителей частиц) довольно широко. Это исследования на Большом Адронном Коллайдере, археологические исследования (крепости Нарын-Кала в Дербенте, монастыря в Переяславле-Залесском (НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ и ФИАН, МИФИ) и многие другие), исследования состояния вулканов и атмосферы Земли, исследования на АЭС (работы на Калиниской АЭС в России), о чём свидетельствует огромное количество публикаций, вот лишь некоторые из них: [68, 134–139]. Возникли целые направления – мюонная радиология, мюонная радиография, мюонография, мюонная томография. Для всех указанных примеров характерны значительные времена экспозиции (облучения мюонами детекторов) до получения желаемого результата, как правило, – многие часы, дни и месяцы. При работе с космическими мюонами характерно использование детекторов, установленных внутри или за исследуемыми объектами, достигается пространственное разрешение от единиц метров до долей сантиметров. В качестве детекторов мюонов применяют:

– при малых потоках мюонов (~10 с$^{-1}$см$^{-2}$) – трековые: полупроводниковые (пиксельные и полосковые) пластины с ядерной эмульсией, камеры с инертным газом, дрейфовые трубки;

– при больших потоках мюонов (~1000 с$^{-1}$см$^{-2}$) – катодные полосковые камеры (дают лучшее пространственное разрешение, порядка 200 мкм), камеры с резистивными пластинами для быстрого и точного измерения времени пролёта мюона, фотоумножительные трубки и полупроводниковые умножители, акустические детекторы и др. [140–142].

Пример результатов осуществления мюонографического исследования можно видеть в работе [140] (рис. 9), где отмечается полное совпадение реальных геометрических параметров шахты с изображением, полученным с помощью анализа пластин с эмульсией.

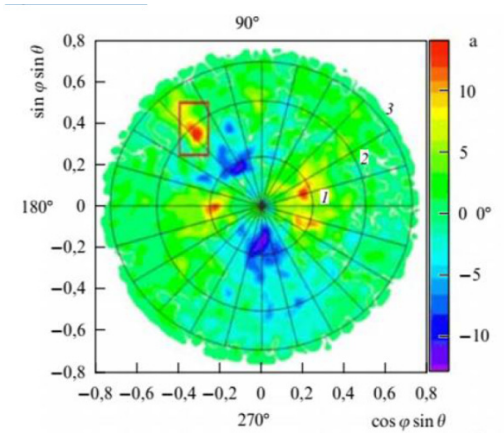


Рис. 9. Анализ мюонографического изображения объекта для шахты в Обнинске (фото НИИ Ядерной физики имени Д. В. Скобельцына)

Помимо указанных направлений исследований с помощью мюонов, для которых характерно значительное время экспозиции и размеры детекторов, в настоящее время активно развивается и внедряется на практике применение мюонной томографии (мюонографии) при резком сокращении времени экспозиции и достижении при съёмке показателей реального времени установления структуры анализируемого объекта. Как можно судить по открытым источникам, с 2000-х гг. мюонная томография практически в реальном времени производится и совершенствуется при решении инспекционных задач, в том числе, отслеживании грузов с ядерными делящимися веществами и материалами с субдециметровым пространственным разрешением (Лос-Аламосская национальная лаборатория (США), калифорнийская фирма Decision Sciences Corporation (DSC), задействованная также в оборонных проектах, Флоридский технологический институт, Массачусетский технологический институт (MIT) [72, 120, 123–126, 138, 143, 144]). В частности, в работе [120] приводятся данные о том, что в 2011 г. в Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) проведён эксперимент на АЭС Три Майл Айлэнд по установлению профиля заранее заданной конической полости в свинцовом ядре реактора. Во всех упомянутых случаях в работах [120, 143, 144] речь идёт о естественных источниках мюонов. О достижениях Лос-Аламосской лаборатории и компании DSC также говорит следующее. Согласно публикации [144] в промышленную и коммерческую эксплуатацию массово внедряются инспекционные системы реального времени, позиционируемые фирмой DSC как системы мюонной томографии. В брошюре о разработках фирмы DSC [144] приводятся следующе наглядные изображения (рис. 10).

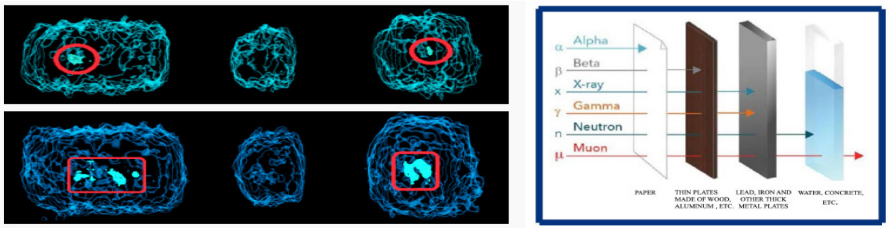


Рис. 10. Иллюстрации результатов 3D сканирования (мюонографии) грузов по данным DSC (слева – наркотические вещества, спрятанные в бананах, справа – иллюстрация проникающей способности излучений и частиц)

В ходе решения инспекционных задач для определения наличия и местоположения опасных и иных грузов применяются малогабаритные мюонные сканеры, внедренные с 2019 г., с детекторами на основе трековых алюминиевых трубок. По данным фирмы DSC инспекции могут подлежать любые грузы, для которых имеет место уникальное их отображение на картинной плоскости или в пространстве (рис. 10). Причём, как следует из публикаций [120, 140, 143, 144], в каждом случае для объекта получают его уникальное изображение в виде мюонограммы, что, вероятно, позволяет обнаруживать и подвижные объекты. По причине того, что при распространении в атмосфере лишь малая часть космических мюонов достигает поверхности Мирового океана [68, 73] (см. подраздел 2.3) осуществление задач инспекции за счёт естественного фона мюонов в реальном времени представляется не столь вероятным, что не исключает достижения, приведённые в источниках [143, 144]. В связи с этим можно предположить, что для получения мюонов на практике используются малогабаритные энергетические установки, обеспечивающие необходимую плотность потока мюонов, например созданные по схемам [78–79, 83, 84–93], каким-то образом задействуются цепочки мюонных нейтрино (5) и (6), позволяющие по реакциям (7) получать мюоны уже в детекторах.

Навигация с помощью мюонов

Описанные ранее достижения в области исследования вещества с помощью мюонов явились своего рода основой для решения с помощью разработанных и практически освоенных методов вопроса о навигации. Известно, что в ряде стран, главным образом США, Англии, Японии, Финляндии, стран еврозоны, на официальном уровне по линии министерства обороны США (Управление военно-морских исследований ВМС США, англ. ONR) проводится работа по технической проработке концепции высокоточной навигации, вероятно, в глобальном масштабе, без привлечения или с крайне эпизодическим привлечением данных ГНСС [104]. Как можно судить по открытым публикациям, проводится масштабный конкурс проектов по перспективным тематикам под названием Global-X [145]. Из документа [145] следует, что проект Global-X запущен в 2020 г. под руководством Naval Research (ONR, Office of Naval Research Global (ONR Global)) и US Army Combat Capabilities Development Command (США), в проекте участвуют около 30 стран, ожидается практическая реализация результатов проекта. В рамках проекта ставится, в том числе, задача осуществления мюонной навигации без ГНСС [146–148].

Экспериментальная апробация метода навигации с помощью релятивистских мюонов космического происхождения приведена в журнале Nature в 2020 г., в статье [73] предлагается абсолютно новый, как утверждается, метод 3D позиционирования с помощью космических мюонов (ему дано название: μPS (muon positioning system)). Говорится о глобальном характере мюонной навигации в силу повсеместного наличия естественных мюонных потоков. В статье сообщается, что мюоны движутся в толще воды с релятивистскими скоростями, поэтому скорость мюонов в воде можно считать известной и равной скорости света в вакууме с достаточной точностью. Предполагается, что мюоны распространяются прямолинейно, а искажения траекторий мюонов приводят к погрешностям на уровне допустимого фона. Это одна из причин, по которой, имея у поверхности воды опорные детекторы и измеряя время на преодоление расстояния мюоном между ними и детекторами-приёмниками (на подводном объекте, время-пролётный метод), можно определить координаты детекторов-приёмников, зная координаты опорных детекторов. Сказанное поясняет рис. 11. Как можно судить по статье [73], в основе определения времени (фактически расстояния между опорными и приёмным детекторами) лежит то, что космические мюоны распространяются преимущественно в одном направлении – от неба к поверхности Земли, и выборка по измерениям времени пролёта частиц имеет медиану распределения, соответствующую с достаточной точностью расстоянию между опорным и приёмным детекторами. Длительность выборки определяет количество регистрируемых частиц от каждого из детекторов, которое, в свою очередь, определяет точность позиционирования.

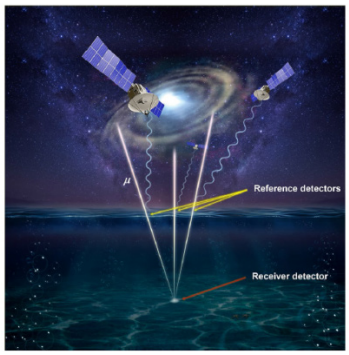


Рис. 11. Изображение концепции метода навигации μPS (muon positioning system) [73]

В статье по результатам натурного эксперимента с космическими мюонами на реальных детекторах показано достижение субдециметровых точностей в лабораторных условиях при имитации толщи воды ~1500 м между опорным детектором, который перемещался, и детектором-приёмником, который был неподвижен, с помощью подбора соответствующих материалов, помещаемых на пути движения потока мюонов. Длительность экспозиции, вероятно, была достигнута на уровне нескольких минут при точности измерения времени порядка 1 нс при относительном перемещении опорного детектора и приёмника в пределах нескольких метров и числе наблюдаемых мюонных событий 10–700 (рис. 12).

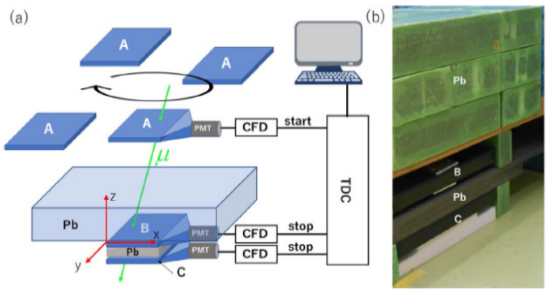


Рис. 12. Экспериментальная установка: *a* – схематичное изображение установки, где символы *A*, *B*, *C*, *Pb*, *PMT*, *CFD* и *TDC* обозначают опорный приёмник, контрольные детекторы, свинцовый блок, фотоумножительную трубку, дискриминатор, конвертер (время-код); *b* – перемещаемый опорный детектор и контрольные детекторы [73]

В работе [73] утверждается, что для расстояний между детектором и приёмником около 1500 м водного столба нужно не менее 1000 событий регистрации для достижения субдециметровой точности позиционирования. Здесь интересным представляется отметить тот факт, что во многом эти результаты согласуются с работами [80, 105], где для достижения точности порядка 3000 м необходимо зарегистрировать не менее нескольких (десяток) событий нейтрино. Как следует из публикации [73], предложенный метод навигации с помощью мюонов аналогичен тому, что используется при навигации с помощью ГНСС (так называемая сильносвязанная схема при интеграции ВСРК с инерциальной системой) [32]. Источником точного времени в данном случае, как и для случая нейтринной навигации (см. подраздел 2.2), вероятно, могут выступать серийные устройства CSAC [129]. В качестве детекторов, возможно, могут использоваться детекторы на основе технологий, предлагаемых в публикациях [72, 123–126, 144] и др. Применённые детекторы прямо указаны в справочной части, касающейся оборудования [73].

В заключение целесообразно отметить следующее. Из-за того, что при распространении мюонов в атмосфере лишь малая их часть достигает поверхности Земли и Мирового океана [68, 73] (см. подраздел 2.3), осуществление навигации за счёт естественного фона мюонов в реальном времени представляется не столь вероятным, что не исключает практического применения результатов, полученных в представленном исследовании [73]. В связи с этим можно предположить, что для получения мюонов на практике могут использоваться малогабаритные энергетические установки (о таком варианте упоминается в работе [73]), обеспечивающие необходимую плотность потока мюонов, при этом каким-то образом задействуются цепочки мюонных нейтрино (5) и (6), позволяющие по реакциям (7) получать мюоны уже в детекторах, а представленная работа [73] являет собой очередной этап отработки методов навигации с помощью релятивистских частиц. Вопрос о вероятных искусственных источниках мюонов будет рассмотрен далее в разделе 4.

3. О возможности осуществления навигации с помощью новых физических явлений

В XX-XXI веке в области ядерной и атомной техники было сделано множество открытий, нашедших свое практическое применение. Фундамент этих достижений во многом был обеспечен трудами учёных России, продолжающих и сейчас исследования

в этой области. Многие из открытых явлений позволили качественно повысить возможности навигации, и навигационного обеспечения различных судов, – так, были созданы атомные энергетические установки, лазерные и волоконно-оптические инерциальные датчики, микроэлектроника, в том числе материалы для её производства. Некоторые из уже открытых в конце XX – начале XXI в. физических явлений могут способствовать созданию новых ВСРК при реализации метода инерциального счисления (см. раздел 1). Одним из таких явлений, как представляется, может быть сравнительно недавно открытое явление, получившее у его авторов название «тепловая волна» [95, 98–103]. Как можно установить из имеющихся открытых источников по данной тематике, такая волна обладает всеми свойствами волны, но имеет и ряд особенностей:

а) тепловая волна может возбуждаться кавитирующим потоком (ударные волны), лазерным излучением, возможно также естественное присутствие данной волны в пределах Земли; возбуждение волны происходит в различных средах при условии длительности воздействия, порождающего волну, меньшего, чем время релаксации среды (элементарного объёма среды, установления там равновесного состояния);

б) тепловые (температурные) волны, могут существовать в разных средах только на определенных частотах, величина которых зависит от времени локальной релаксации теплового возбуждения в этих средах (времени термализации [99]);

в) в воздухе данная волна распространяется следующим образом: минимальная частота 70–80 МГц (может достигать терагерцового диапазона); скорость распространения – 50–100 м/с; в металлах и полупроводниках минимальная частота равна 10^{12}–10^{14} Гц [99];

г) дальность распространения тепловой волны фактически не ограничена;

д) при исследованиях тепловой волны в воздухе применяются малогабаритные акустические детекторы для резонансных частот ~ 1 МГц;

е) существует возможность фокусировки волны.

Принимая во внимание отмеченные свойства указанного нового физического явления, а также вероятность её естественного формирования и распространения в пределах Земли, можно предположить, что это явление могло бы быть применено при создании опорных маячных систем (см. раздел 1), в том числе донных [45]. При наличии у такой волны необходимых условий когерентности её распространения, с учетом частоты её распространения, например в воздухе, можно предположить возможность создания пространственных (естественных или искусственных) высокоточных систем позиционирования, где порождаемая такой волной уже стоячая волна, обладая свойством постоянства положения в пространстве, может быть детектирована на объекте соответствующим детектором. Однако, как и в случае навигации с помощью релятивистских частиц, необходимо решить вопрос источников энергии для порождения такой волны, если, конечно, не рассматривать вероятность и возможность её естественного формирования на Земле.

4. Искусственные источники релятивистских частиц. Энергетические установки

Основываясь на предложенном вниманию читателя материале (в разделах 2, 3), можно предположить, что реализация навигации с помощью релятивистских частиц в полной мере возможна при создании соответствующих поставленной задаче

искусственных источников – генераторов этих частиц (раздел 2). То же в полной мере относится и к навигации с помощью нового физического явления – тепловой волне (раздел 3). Искусственными источниками необходимых частиц являются ускорители [78–79, 82–83, 84–92], которые, как можно судить по существующим публикациям, в частности [79, 88–89, 92–93], уже определяют и будут определять во многом развитие естествознания, техники и промышленности XXI столетия, в то же время являясь одним из основных технических/научных инструментов познания свойств материи.

Как следует из открытых источников [109–111, 149–154], в США ведутся работы и начиная с 2017 г. разрабатываются несколько технических проектов (MuS2, SubT) при участии DARPA, направленных на создание малогабаритного возимого генератора направленных пучков высокоэнергетических мюонов (с энергиями 10–100 ГэВ и выше), имеющего широкое применение, в том числе: сканирование зданий, создание карт подземных коммуникаций в реальном времени без проникновения в эти коммуникации, использование в качестве элемента системы пучкового оружия, использование в качестве элемента энергетической установки, основанной на реакциях низкотемпературного ядерного синтеза. Для последнего рассматривается мюонный катализ [88, 112, 131–132], однако, как следует из работ [109–111], это не единственный предполагаемй для внедрения на практике вариант осуществления реакции в энергетической установке. Как следует из указанных публикаций, критическими технологиями при осуществлении проектов MuS2, SubT являются:

– создание мюонных мишеней;
– создание лазерных установок петаваттного уровня.

Можно предположить, что создание мишеней требуется для осуществления реакции (5), см. подраздел 2.3.

В свою очередь, создание мощных лазерных установок, предположительно, необходимо для инициирования ядерных реакций, аналогичных, например, указанным в работах [78–79, 83, 103], с повышенным энергетическим выходом, а также для создания сверхмалогабаритных ускорителей частиц, основанных на воздействии высокоинтенсивного лазерного излучения на тонкостенные мишени в виде пластин из графена или кварца [90–91]. Показано, что для таких мишеней достигаются высокие энергии частиц и интенсивности их пучков (импульсные токи) при облучении как маломощными лазерами, так и лазерами петаваттного класса. Такого рода сверхмалогабаритные ускорители частиц предположительно могут использовать в том числе ионизированный дейтерий (для создания компактного ускорителя протонов и источника нейтронов), продуцируемый в малогабаритном устройстве, созданном на основе MEMS-технологий [87] (ресурс Массачусетского технологического института).

В ряде источников говорится об определённой уверенности в появлении в короткие сроки ускорительной техники, созданной на новых принципах [83, 84–86, 88, 90–93]. В определённом смысле свидетельством этому являются также появившиеся в патентном классификаторе ЕС новые разделы относительно новых энергетических установок [109], а также материалы, приводимые FIA (Fusion Industry Association) за 2021–2022 гг. [110–111]. Из рассмотренных публикаций относительно проектов MuS2, SubT можно также сделать вывод, что к критическим технологиям при осуществлении проектов можно отнести также÷ создание высокопроизводительных систем для запуска симуляций (по аналогии с вычислениями, осуществляемыми при обработке данных о релятивистских частицах в целях навигации (см. раздел 2). Такие системы

необходимы, по всей видимости, для динамической настройки генератора частиц и осуществления картографирования в реальном времени. Относительно критических лазерных технологий в указанных источниках отмечается, что проекты направлены в числе прочего на увеличение интенсивности потока мюонов, что позволит существенно сократить время экспозиции. Это касается в том числе и использования уже разработанных лазеров, вероятно, аналогичных тем, что применяются в армии и ВМС США, как, например, боевой лазер непрерывного действия на автомобильном шасси мощностью 300 кВт [155]. Можно предположить, что создание петаваттного лазера нужно для увеличения энергии пучка мюонов до значений более 100 ГэВ.

Интересным представляется то, как в рамках программы SubT, реализуемой DARPA, предполагается осуществлять картографирование, по сути, мюонную томографию подземных коммуникаций с помощью разрабатываемых генераторов мюонов. Наглядное представление об этом, как возможный вариант, предложено в работе [154]. Однако, исходя из принципов мюонной томографии, для сканирования объекта требуется два детектора: один на входе мюонов в объект, другой – на выходе мюонов из объекта, как это уже имеет место на практике [144]. Но в предлагаемом варианте детектор возможен только один – на выходе генератора мюонов или рядом с ним. Таким образом, для такого сканирования необходимо как бы отражение мюонов от объекта облучения или близлежащих объектов, подстилающей поверхности. Представляется, что такое возможно, если учесть приведённую в подразделе 2.3 реакцию (7), когда при взаимодействии $\nu_\mu + n \to \mu^- + p$ «разлёт» образовавшихся мюонов происходит изотропно, т. е. мюоны могут двигаться и в направлении, обратном направлению движения налетающего мюонного нейтрино.

Из числа коммерческих малогабаритных автономных источников энергии из известных разработок (2019–2023 гг.) можно отметить совместный проект США и Германии под названием Neutrino Power Cube [156].

О существующих достижениях в области промышленного внедрения энергетических установок, массовое внедрение которых, как можно судить по приводимым источникам, планируется в 2030-х гг., основанных на энергии синтеза (водород-борные реакторы) говорят материалы, опубликованные компанией Tri Alpha Energy (США) [108], где приводятся данные о том, что реактор 5-го поколения C-2W/Norman вырабатывает энергию порядка 750МВт) и компанией Lockheed Martin (США) (публикация группы с названием Skunk Works – буквально: «Сделать всухую» с броским заголовком Restarting the Atomic Age [107]). О реализации такого рода проектов говорит также опубликованная США по линии Министерства энергетики и Пентагона концепция создания возимого ядерного источника энергии мощностью порядка 100 МВт размером с морской контейнер. С большой долей вероятности, учитывая предполагаемую массовость, он не будет построен на реакции спонтанного деления урана, в том числе ввиду крайней ограниченности ресурсов ^{235}U [157–160] и наличия продуктов деления, требующих утилизации [92].

О потенциале, который, вероятно, позволяет осуществлять реальные проекты [155], например в области создания малогабаритных ускорителей и энергетических установок [82] говорят разработки, представленные в публикациях [78–79, 83, 84–88, 90–103]. Анализ приведённых работ позволяет выявить три самостоятельных пути, прошедших экспериментальную апробацию и пригодных для промышленного создания перечисленных ниже установок – генераторов релятивистских частиц:

а) малогабаритных ускорителей, построенных по схеме ускорителей протонов на обратной волне (так называемые УЛОВ, BWLAP [78–79, 83, 92–93]), ключевыми особенностями которых являются:

– [83] уникальное соотношение интенсивности пучка (до 300 мА в пучке; для сравнения: в [89] приводятся сведения о пиковых токах в пучке ускорителей для медицинских целей порядка единиц мкА), мощности выходного пучка протонов (порядка 10 ГэВ),

– возможности «изгибания» линии ускорения пучка благодаря действию ускоряющего поля навстречу ускоряемому пучку, чем достигаются минимальные габариты (ускоритель ГэВ-го уровня вписывается в небольшой ангар),

– работы ускорителя при температурах порядка 300К при его охлаждении проточной водой, КПД 40–70 %, в отличие от уже ставших классическими линейных ускорителей с криогенным охлаждением;

б) сверхмалогабаритных ускорителей, построенных на основе технологий воздействия лазерным излучением на сверхтонкостенные мишени: пластины графена (исследования Университетов Осаки, Кобе (Япония), Центрального научного университета Тайваня) или кварца (исследования Манчестерского университета, Великобритания). Для последнего варианта отмечается ключевой момент – воздействие на мишень терагерцовыми импульсами лазерного излучения, что вызывает особенный интерес ввиду сведений, приводимых в работе [115], когда возможно появление состояний ККС) [90–91]. Представляется, что при создании таких ускорителей может иметь место схема построения, аналогичная ускорителю УЛОВ (BWLAP), когда ускорительный тракт можно «изгибать», но не воздействием электрических полей навстречу пучку, а с использованием механизма «бездиссипативного каналирования движущихся заряженных частиц около проводника с током», описанного в статье [103].

Эти три пути, обеспечивающие энергетику рассмотренных ускорителей, можно обозначить как создание:

– сравнительно малогабаритных (при размещении в месте нахождения ускорителя) энергетических установок, построенных по схеме ЯРТ сжигания тяжёлых изотопов урана и тория, когда происходит облучение соответствующих материалов высокоэнергетическими нейтронами, порождаемыми при взаимодействии высокоэнергетических протонов, полученных в ускорителе, с мишенью [79, 92–93],

– энергетических установок, основанных на принципе, использующем механизм когерентных коррелированных состояний (ККС) [96, 98–103], состояний, порождаемых в различных средах при действии живых организмов, ударных волн, лазерного излучения, тепловой волны, вынужденных колебаний кристаллической решётки атомных наноструктурированных материалов [94–97, 99–100, 103, 114–115, 156]; здесь следует отметить, что, согласно работе [100] была проведена управляемая реакция синтеза в течение длительного времени, что говорит о возможности энергетической модуляции параметров пучков релятивистских частиц для реализации задачи навигации,

– энергетических установок на основе протекания ядерных реакций при мюонном катализе (образование мезомолекул с отрицательным мюоном в дейтерии, см. также п. 2.3) [88, 112, 131–132] с активным избыточным энерговыделением.

В заключение интересным представляется отметить, что в конце 2023 г. компанией Neutrino Energy (США, Германия) анонсирован промышленный выпуск

установочной партии [156] так называемых нейтринных генераторов энергии типа Neutrino Power Cube (см. рис. 13), преобразующих энергию космических релятивистских частиц, нейтрино, благодаря чему обеспечивается выходная мощность (установочная мощность ~5 кВт, вес ~50 кг, габариты ~500x500x600 мм, основной энергопроизводящий элемент – наноструктурированный легированный материал на основе графена на алюминиевой каркасной подложке (~200x300мм) [113], для которого характерны определённые колебания, срок службы порядка 10 лет, время непрерывной работы – не ограничено [156]).

Рис. 13. Предполагаемый внешний вид генератора Neutrino Power Cube

Анализ имеющихся данных (разделы 2, 4) позволяет предположить, что предложенный механизм энергогенерации – некая красивая легенда, поскольку сечение взаимодействия космических частиц и плотность их потока на единицу площади не позволяют обеспечить заявленную выходную мощность даже при прямом преобразовании энергии. Однако, можно предположить, что представляется вероятным достижение требуемого энергетического выхода:

– при реализации механизма ККС в условиях терагерцовых, исходя из модуля Юнга графена [113–114],

– при амплитудах доли и несколько нм [114–115] поддерживаемых (резонансных) колебаний легированных, например, водородом графеновых структур [99, 103, 115],

– при естественной инжекции космических мюонов в область колебаний графена (для восполнения мюонов из-за их “прилипания” к α частицам и образовании мезомолекул при реакциях сродни мюонному катализу [120, 132]).

Другим или же сопутствующим механизмом, обеспечивающим работу такого энергетического устройства, может быть механизм образования мезомолекул при мюонном катализе [88] с обеспечением недостающих частиц и энергии при воздействии на графеновые структуры лазерным излучением достаточной мощности и/или электромагнитным полем определённой частоты [87, 91]. Вероятно, образующаяся в реакциях синтеза в таком устройстве неуловимая частица нейтрино получила своё место в его названии. Терагерцовые волны колебаний графеновой структуры, видимо, необходимы для того, чтобы обеспечить воздействие на полупроводник с частотой, превышающей время «термализации» [99] в материале. Вес такого устройства, вероятно, обусловлен необходимостью экранирования потребителя от вредных излучений и, возможно, прямым преобразованием возникающих в устройстве излучений в электрический ток. По-видимому, для запуска такого устройства перед его непрерывной эксплуатацией необходим сравнительно маломощный источник первичной энергии [88]. Энергетический баланс такого

устройства могут оценить специалисты, что, по-видимому, на современном этапе развития атомной и ядерной физики не представляет значительных трудностей. Приводимые материалы, говорящие о достигнутом в России и мире технологическом уровне, во многом свидетельствуют о реальной возможности достижения энергетического обеспечения задачи навигации с помощью релятивистских частиц.

Заключение

Приведённые в настоящем обзоре-исследовании некоторые сведения позволяют заключить, что в мире, главным образом в США, странах еврозоны, Великобритании и в какой-то степени – в Японии и Китае, быстрыми темпами, особенно с 2019–2023 гг. развивается направление широкого практического, в том числе коммерческого, применения технологий, связанных с продуцированием, детектированием, анализом и последующим использованием накопленной информации о поведении релятивистских частиц – мюонов и нейтрино – в веществе. Рассматриваются частицы как естественного (космического), так и искусственного (полученные на ускорителях) происхождения. Продуцирование таких частиц уже осуществляется или может осуществляться [109–111] с помощью мобильных ускорителей, к которым относятся:

– ускорители протонов на обратной волне (УЛОВ, BWLAP) с уникальными соотношениями интенсивности пучка (до 300 мА), энергии частиц в пучке (10ГэВ) и массогабаритных характеристик [78, 83], работающие без криогенного охлаждения;

– сверхмалогабаритные ускорители, где воздействием лазерного терагерцового излучения на сверхтонкостенные мишени из графена или кварца достигаются значительные потоки практически релятивистских частиц [90–91], особенно предполагая возможность использования эффекта бездиссипативного каналирования движущихся заряженных частиц [103].

Энергетическую основу источников околорелятивистских и релятивистских частиц обеспечивают или могут обеспечивать энергетические установки на основе технологии ЯРТ [79, 92–93], технологии, опирающейся на механизм ККС [96, 98–103], мюонный катализ [88, 112, 131–132] и другие технологии ядерного синтеза при температурах ~300 К. Массовое практическое внедрение установок ожидается в период 2024–2030 гг. и опирается на существующий уровень развивающихся технологий [109–111]. В проектах участвуют фирмы Lockheed Martin (США), Tri Alpha Energy (США) и др. организации и участники [108, 110–111, 161] из США и стран еврозоны, которые реализовали в XX в. так называемый Манхеттенский проект. Нет сомнений, что отмеченные существующие и активно совершенствуемые технологии уже позволяют и позволят в скором будущем создавать системы инспекции, мониторинга, сканирования, наблюдения (типа SOSUS [130]), вооружения, системы навигации с новыми качествами. Создание таких систем требует определённого уровня кооперации и взаимодействия, который в своё время был достигнут в России, о чём ярко повествуется в работах [3, 17, 31].

Возможные перспективы совершенствования систем навигации, при выборе стратегии развития «обогнать, не догоняя», можно представить, обратившись к фактам из живой природы. Так, небольшого размера птица – малый веретенник – совершила беспосадочный 11-дневный перелёт из Юго-западной Аляски до залива близ Окленда (Новая Зеландия) вдоль западных берегов Тихого океана на удалении траектории движения от берега около 2000 км. Длина пути этой птицы составила порядка 13000 км. Принимая во внимание достигнутую точность определения птицей своего

текущего местоположения, дальность беспосадочного перелёта и его длительность, высоту полёта, массу птицы, энергетические возможности птицы, можно утверждать, что раскрытие механизмов навигации в живой природе позволит создать уникальные системы автономной навигации без применения энергоёмких ускорительных систем. Поиск путей реализации механизмов навигации в живой природе представляется целесообразным осуществлять в области ядерной физики, физики элементарных частиц и сопутствующих областях фундаментальной и прикладной науки, в том числе, описанных ранее в настоящей статье.

Завершая, хочется привести слова В. Паули [70] из письма конца 1930-х гг. в связи с предсказанием им нейтрино, что было им сделано ввиду твёрдой веры в закон сохранения энергии. Письмо заканчивалось так: «Не рисковать – не победить. Тяжесть положения при рассмотрении непрерывного β-спектра становится особенно яркой после слов проф. Дебая, сказанных мне с сожалением: «Ох, лучше не думать обо всем этом... как о новых налогах». В отношении пути, который необходимо и предстоит пройти, крайне своевременным представляется привести цитату из главы «Пути термоядерных исследований» избранных трудов Л. А. Арцимовича [162]: «В своё время в Александрии один из царей спрашивал Евклида, не существует ли простого способа познакомиться с геометрией. На это Евклид сказал: «Царского пути в геометрии нет…».

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность и благодарность акад. РАН, докт. техн. наук., проф. В. Г. Пешехонову и проф. Г. И. Емельянцеву за ценные советы и замечания, данные в ходе подготовки материалов настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В. Г. Проблема подводной навигации и её решение // Роль российской науки в создании отечественного флота / под. общ. ред. А. А. Саркисова. – М.: Наука, 2008. – С. 383–390.
2. Пешехонов В. Г., Зиненко В. М., Савик В. Ф., Янушкевич В. Е. Тенденция развития отечественных перископных комплексов и астрокорректоров подводных лодок // Роль российской науки в создании отечественного флота / под. общ. Ред. А.А. Саркисова. – М.: Наука, 2008. С. 391–394.
3. Пешехонов В. Г. Короткий век радиосекстана // Гироскопия и навигация. Том 26. 2018. № 2 (101). – С. 95–104.
4. Ишлинский А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.: Наука, 1976. – 672 с.
5. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Кн. I . Автономные системы. Кн. II. Корректируемые системы. – М.: Наука, 1967. – 648 с.
6. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации. – М.: Наука, 1979. – 294 с.
7. Ривкин С. С. Теория гироскопических устройств. Ч. 1. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 508 с.
8. Крылов А. Н., Крутков Ю. А. Общая теория гироскопов и некоторых технических их применений. – Л.: Изд-во АН СССР, 1932. – 407 с.
9. Магнус К. Гироскоп. Теория и применения. – М.: Мир, 1974. – 526 с.
10. Автокомпенсация инструментальных погрешностей гиросистем / С.М. Зельдович, М.И. Малтинский, И.М. Окон и др. – Л.: Судостроение, 1976. – 255 с.
11. Булгаков Б.В. Колебания. – М.: Гостехиздат, 1954. – 891 с.
12. Лурье А.И. Аналитическая механика. – М.: Физматгиз, 1961. – 824 с.
13. Инерциальные навигационные системы морских объектов / Д. П. Лукьянов, А. В. Мочалов, А. А. Одинцов, И. Б. Вайсгант, – Л.: Судостроение, 1989. – 184 с.
14. Большой энциклопедический словарь. – URL: https://rus-big-enc-dict.slovaronline.com (дата публикации: 2010).
15. Сундаков В. В. Пути-дороги и путники и странники [Видеозапись] / Лекция № 5 Русской школы русского языка 00:18:04 (время воспроизведения). – URL: https://sundakov.ru/vitaliy-sundakov-russkaya-shkola-russkogo-yazyika-urok-5.
16. Гироскопия. Терминология. – Сборник научно-нормативной терминологии. Выпуск 118. Институт проблем передачи информации РАН. – М.: 1994. – 40 с.
17. Малеев П. И. Новые типы гироскопов. – Л.: Судостроение, 1971. – 160 с.

18. Пешехонов В. Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. – 2020. – Том 28. – №2(109). – С. 3–8.
19. Вершовский А. К., Литманович Ю. А., Пазгалёв А. С., Пешехонов В. Г. Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. – 2018. – Том 26. – №1(100). – С. 55–80.
20. Анучин О. Н., Емельянцев Г. И. Бесплатформенные инерциальные системы навигации и ориентации. – СПб., ИТМО, ВВМУ им. МВ Фрунзе, 1998. – 110 с.
21. Walsh Ed. Navy and industry investigate new super-accurate optical gyros for possible use on ballistic missile submarines, Military & Aerospace Electronics, 2001. – URL: https://www.militaryaerospace.com/computers/article/16710629/navy-and-industry-investigate-new-superaccurate-optical-gyros-for-possible-use-on-ballistic-missile-submarines (дата обращения: 25.12.2022).
22. Ringlein Mark J. Next generation strategic submarine navigator // Mark J. Ringlein, Neal J. Barnett, Marvin B. May; AIAA 2000. – URL: http://www.researchgate.net (дата обращения: 25.12.2022).
23. Travagnin M. Cold atom interferometry for inertial navigation sensors. Technology assessment: space and defence applications, 2020, EUR 30492 EN // Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020. – 45 p. doi:10.2760/237221, JRC122785
24. Carlos L. Garrido Alzar Compact chip-scale guided cold atom gyrometers for inertial navigation: Enabling technologies and design study. – 2019. – 1–21 pp. – URL: https://arxiv.org/pdf/1912.06851.pdf (база данных Корнелльского университета Cornell University, США)
25. Шимбирев Б.П. Теория фигуры Земли. - М., Недра, 1975. – 43 с.
26. Пасынок С. Л. Методы и средства определения параметров вращения Земли // Альманах современной метрологии. – 2016. – № 8. – С. 269–323.
27. Марков Ю. Г., Перепёлкин В. В., Чазов В. В., Шемяков А. О. Фундаментальные параметры вращения Земли в определении точности долгосрочных эфемеридно-временных поправок в спутниковой навигации // Доклады Академии Наук. – 2015. – Т. 465. – № 6. – С. 1–5.
28. Каракашев В.А. Автономные инерциальные навигационные системы. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1983. – 89 с.
29. Анучин О. Н., Емельянцев Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под общей ред. академика РАН В. Г. Пешехонова. Изд. 2-е, перераб. и доп.. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 390 с.
30. Емельянцев Г. И., Степанов А. П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации // Под общей ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», НИУ ИТМО. – 2016. – 394 с.
31. Бакитько Р. В., Болденков Е. Н., Булавский Н. Т., Дворкин В. В., Ефименко В. С. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирвоания / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
32. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. – URL: https://glonass-iac.ru (дата обращения: 28.05.2023)
33. Пешехонов В. Г. Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация. – 2022. – Том 30. – №1(116). – С. 3–11.
34. Белоглазов И. Н., Джанджгава Г. И., Чигин Г. П. Основы навигации по геофизическим полям. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 328 с.
35. Степанов О. А. Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах // Аналитический обзор / Санкт-Петербург, 1993. – 85 с.
36. Пешехонов В. Г. Проблема уклонения отвесной линии в высокоточной инерциальной навигации // Гироскопия и навигация. – 2020. – Том 28. – № 4(111). – С. 3–15.
37. Степанов О. А., Торопов А. Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Часть 1. Обзор Алгоритмов // Гироскопия и Навигация. – 2015. – №3(90). – С. 102–125.
38. Власов И. Б. Глобальные навигационные спутниковые системы: Учебн. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 182с.
39. Сайт Starlink. – URL: https://www.starlink.com.
40. Stephen Clark Spaceflight now. Documents suggest SpaceX may launch 30,000 more Starlink satellites. – URL: https://spaceflightnow.com/2019/10/15/documents-suggest-spacex-may-launch-30000-more-starlink-satellites / (дата обращения: 10.09.2023).
41. Макода В. С. Тенденции развития спутниковых навигационных систем в США // Навигация и Гидрография. – 1995. – № 1. – С. 132–134.
42. Приёмник ГНСС Комета м.– URL: https://kopterinfo.ru/priyemnik-gnss-kometa-m (дата обращения: 10.09.2023).
43. Groves P.D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems; GNSS technology and application series; 2nd ed. – Artech House: Boston, 2013. – 800 p.
44. Кулакова В. И., Ноздрин С. А., Сохарев А. Ю., Царик Д. В. Система микронавигации для поддержки радиолокатора с синтезированной апертурой на борту малогабаритного БПЛА // Гироскопия и навигация. – 2019. – Том 27. – № 4(107). – С. 130–146.
45. Малеев П. И. Некоторые перспективы использования новых эффектов и явлений для навигации и гидрографии // Навигация и Гидрография. – 1995. – № 1. – С. 29–36.

46. Кошаев Д. А. Многоальтернативный алгоритм одномаяковой навигации автономного необитаемого подводного аппарата без априорных данных о его местоположении. Часть 1. Математическое описание // Гироскопия и навигация. – 2020. – Том 28. – № 2(109). – С. 109–130.
47. Кошаев Д. А. Многоальтернативный алгоритм одномаяковой навигации автономного необитаемого подводного аппарата без априорных данных о его местоположении. Часть 2. Моделирование // Гироскопия и навигация. – 2020. – Том 28. – № 3(110). – С. 76–94.
48. Емельянцев Г. И., Степанов А. П., Блажнов Б. А. О решении навигационной задачи для летательных аппаратов с использованием инерциального модуля на микромеханических датчиках и наземных радиоориентиров // Гироскопия и навигация. – 2017. – Том 25. – № 1(96). – С. 76–94.
49. National Geodetic Survey. National Oceanic and Atmospheric Administration: офиц. сайт. – URL: https://www.ngs.noaa.gov (дата обращения: 10.09.2023).
50. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Пешехонов В. Г., Степанов О. А., Августов Л. И., Блажнов Б. А., Болотин Ю.В. и др. / Под общей ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова; науч. редактор д. т. н. О. А. Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. – 390 с.
51. Лебедев К. В. АРГО-модель исследования глобального океана: синтез наблюдений и численного моделирования // Океанологические исследования. – 2017. – Том 45. № 1. С. 53–69.
52. Argo-Model for Investigation of the Global Ocean / сайт проекта AMIGO. – URL: http://argo.ocean.ru (дата обращения: 25.12.2022).
53. What is Argo? / офиц. сайт: проект АРГО. – URL: http://www.argo.ucsd.edu (дата обращения: 25.12.2022).
54. The JCOMM in situ Observations Programme Support Centre IOC ASSEMBLY RESOLUTION XX-6 / офиц. сайт. – URL: http://argo.jcommops.org/IOC_Resolution_XX-6.html (дата обращения: 10.09.2023).
55. Толкачев А. Буи «АРГО» Сайт Морские исследования России. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, 2006. – URL: https://ocean.extech.ru/ioc/programs/argo.php (дата обращения: 10.09.2023).
56. Международный проект Арго отмечает 20-летие // Сайт Гидрометцентра России. 2019. URL: https://meteoinfo.ru/novosti/99-pogoda-v-mire/15755-mezhdunarodnyj-proekt-argo-otmechaet-20-letie (дата обращения: 10.09.2023)
57. Безруков Л., Синев В. Геонейтрино и тепловой поток Земли: презентация доклада на юбилейном семинаре Л.Б. Безрукова в Институте ядерных исследований РАН: 15 апреля 2015. – Электронный архив ОИЯИ РАН. – URL: http://www.inr.troitsk.ru/rus/2015/sinev-bez.pdf (дата обращения: 25.12.2022).
58. Водородная “Бомба” под ногами и под нефтяной экономикой: видеозапись заседания Научного Совета РАН в 2015г. под председательством д.э.н., акад. РАН Глазьева С. Ю.: выступления Полеванова В. П., Ларина В. Н., Иванова В. В., Безрукова Л. Б., Сывороткина В. Л. (МГУ, ИЯИ РАН, РАН): Телеканал Нейромир ТВ 01:48:11 (время воспроизведения).– URL: https://neuromir.tv/vodorodnaya-bomba-pod-nogami-i-pod-neftyanoy-ekonomikoy (дата обращения: 10.09.2023).
59. Поляк Б. Г., Хуторской М. Д. Тепловой поток из недр − индикатор глубинных процессов // Георесурсы, – 2018. – Т. 20, – № 4. – Ч. 2. – С. 366–376.– URL: https://geors.ru/media/full_issue/J_2018_4_1-2_rus_opt.pdf (дата обращения: 10.09.2023).
60. Баранов В. И., Сердюкова А. С. Радиогенное тепло // Природа. – 1959. – № 3. – С. 29–34.
61. Баранов В.И. Развитие радиогеологии в СССР // Атомная энергия. – 1968. – Т. 24. – Вып. 5. – С. 419–421.
62. Bezrukov L., Kurlovich A. S., Lubsandorzhiev B. et al. How Geoneutrinos can help in understanding of the Earth heat flux //Journal of Physics Conference Series. – December 2017. – 934(1):012011. DOI: 10.1088/1742-6596/934/1/012011. – 1–5 pp.
63. Ларин В. Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). – М.: Агар. – 2005. – 242 с.
64. Larin,V. N., ed. C. Warren Hunt. Hydridic Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-Rich Planet. Polar Publishing, Calgary, Alberta, Canada, 1993.– 242 p.
65. Leonid Bezrukov. Geoneutrino and Hydridic Earth model. Version 2. Preprint INR 1378/2014. arXiv:1308.4163. – URL: https://arxiv.org/pdf/1308.4163.pdf (архив открытого доступа Корнелльского университета Cornell University, США).
66. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация в полярных регионах планеты и климатические изменения // Актуальные проблемы нефти и газа. Издательство Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа РАН (Москва). – 2018. – № 4(23). – С. 23–29.
67. Vysotskii V. I., Vysotskyy M. V., Kornilova A. A., Gaydamaka S. N., Novakova A. A., Novikov D. S., Avdonin V. V. Creation of Fe Isotopes in Natural Geology Crusts as the Result of Self-controlled Global Biostimulated LENR in Oceans and Seas // Journal of Condensed Matter Nuclear Science. – 2020. – Vol. 3. – 323–332 pp.
68. Общий ядерный практикум / Электронное методическое пособие к практическим занятиям. Физический факультет МГУ, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына. Web-версия издания «Частицы и атомные ядра. Практикум» Москва 2004. Новые версии описаний задач.– URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru (дата обращения: 25.12.2022).
69. Гончарова Н. Г., Ишханов Б. С., Капитонов И.М. Частицы и атомные ядра. Задачи с решениями и комментариями. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 448 с.
70. Нозик В. Нейтрино // Наука и жизнь – 2000. – № 2. URL: https://www.nkj.ru/archive/articles/6592 (дата обращения: 25.12.2022).
71. ЛЭЯФ НИЯУ МИФИ. Сборник трудов. Выпуск 3. – М.: НИЯУ МИФИ, 2019. – 192 с.

72. Мюонный метод исследования вещества / В. П. Смилга, Ю. М. Белоусов. - Москва: Наука, 1991. – 344 с.
73. Tanaka H.K.M. Muometric positioning system (μPS) with cosmic muons as a new underwater and underground positioning technique. Sci. Rep. – 2020. – No 10, 18896. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-020-75843-7 (дата обращения: 25.12.2022).
74. Review of Particle Physics. M. Tanabashi et al. (Particle Data Group). Phys. Rev. D 98, 030001. – Published 17 August 2018. URL: https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.98.030001 (дата обращения: 25.12.2022).
75. Белоусов Ю. М., Смилга В. П. Что такое мюонный метод исследования вещества // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 1. – 76–85 с.
76. Schrödinger E. Zum Heisenbergschen Unschärfeprinzip // Ber. Kgl. Akad. Wiss. – Berlin. – 1930. – 24. – 296–303 p.
77. Robertson H. P. A general formulation of the uncertainty principle and its classical interpretation // Phys. Rev. 1930. No 35. – P. 667A.
78. Bogomolov A. S. BWLAP – backward wave linear accelerator of protons // 1994 Linear Accelerator Conference. Tsukuba, Japan. 21–26 August 1994. – 1994. – 789–791 pp. – URL: https://accelconf.web.cern.ch/l94/index.htm (дата обращения: 25.12.2022)
79. Острецов И. Введение в философию ненасильственного развития. – Ростов-на-Дону: Комплекс, 2002. – 231 с.
80. Prietoa J. F., Melisa S., Cezona A. et al. Submarine Navigation using Neutrinos. – 2022. – 10 p. – URL: // https://arxiv.org/pdf/2207.09231.pdf (архив открытого доступа Корнелльского университета (Cornell University, США).
81. Gutt Gregory M. Navigation system based on neutrino detection / Patent US20090228210A1. Priority to US11/770,652: 2007-06-28. Assigned to THE BOEING COMPANY: 2009-09-10. Publication of US20090228210A1: 2011-03-22. Priority to US13/069,240. URL: https://patents.google.com/patent/US20090228210A1/en (дата обращения: 25.12.2022)
82. Todd A. M. M., Bauer T., Gillespie G. H. Preliminary Assessment of Novel RF Linear Accelerator Structures in The Former Soviet Union, prepared for: United States Army Space and Strategic Defense Command // NPBSE-94. – 1994. – Feb. 7. – P. 68.
83. Богомолов А. С., Бакиров Т. С., Богданов П. К. Ускорители на обратной волне как альтернатива классическим сверхпроводящим ускорителям // Вестник научно-технического развития. – 2011. – № 4(44). – С. 8–19.
84. DARPA program seeks highly portable neutron sources to complement X-ray capabilities/ Phys.org. News and Articles on Science and Technology. September 25, 2014 // URL: https://phys.org/news/2014-09-darpa-highly-portable-neutron-sources.html (дата обращения: 25.12.2022)
85. Frédéric Ott. Compact Neutron Sources for Neutron Scattering. [Technical Report] CEA Paris Saclay. 2018. cea-01873010f. – 25 pp. – URL: https://cea.hal.science/cea-01873010/document (дата обращения: 25.12.2022)
86. Carpenter J. M. Development of compact neutron sources // EPJ Web of Conferences. – 2020. – Vol. 231. 8th International Meeting of Union for Compact Accelerator-Driven Neutron Sources (UCANS-8). Paris, France, July 8–11, 2019. – 4 p. DOI: https://doi.org/10.1051/epjconf/202023101001. – URL: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2020/07/epjconf_ucans82020_01001.pdf (дата обращения: 25.12.2022)
87. Akinwande A., Guerrera S. MEMS Ionizers for Compact Neutron Sources / TECHNOLOGY #17549. – MIT TLO (Technology Licensing Office), USA. – URL: https://tlo.mit.edu/technologies/mems-ionizers-compact-neutron-sources (дата обращения: 25.12.2022).
88. Holmlid L. Existing Source for Muon-Catalyzed Nuclear Fusion Can Give Megawatt Thermal Fusion Generator // Fusion Science and Technology. – 2019. – Vol. 75(3). – 1–10 pp. DOI: 10.1080/15361055.2018.1546090.
89. Smirnov V. L., Vorozhtsov S. B. Modern compact accelerators of cyclotron type for medical applications // Physics of Particles and Nuclei. – 2016. – Vol. 47. – С. 863–883.
90. Hibberd M. T., Healy A. L., Lake D. S. *et al.* Acceleration of relativistic beams using laser-generated terahertz pulses. *Nat. Photonics*. – 2020. Vol. 14. – 755–759 pp. doi.org/10.1038/s41566-020-0674-1.
91. Шевченко А. С помощью мощного лазера ученые сделали из графена компактный ускоритель ионов и протонов // Онлайн журнал Neftegaz.ru. 22.02.2022.– URL: https://neftegaz.ru/news/standarts/726639-s-pomoshchyu-moshchnogo-lazera-uchenye-sdelali-iz-grafena-kompaktnyy-uskoritel-ionov-i-protonov (дата обращения: 25.12.2022).
92. Острецов И. Н., Волков В. И. Стратегия развития ядерной энергетики. Основные инструменты развития безопасной ядерной энергетики России / Экономика России. Взгляд в будущее. 2011–2012: Российская акад. наук, Российская акад. бизнеса и предпринимательства. Под ред. Т. Евтеева и др. – М.: Асмо-Пресс, 2012. – С. 270–279. – URL: // http://pereprava.org/uploads/doc/270-279%20-%20Volqov,%20Ostretcov.pdf (дата обращения: 25.12.2022).
93. Острецов И. Н., Пащенко В. П. Нагрев большой свинцовой мишени протонами энергий 5 ГэВ // Атомная энергия. – 2000. – Т. 88. – Вып. 4. – С. 314–315.
94. Бельтюков И. Л., Бондаренко Н. Б., Джанелидзе А. А. и др. Лазерно-индуцированная реакция холодного ядерного синтеза в системе металл-газ для Ti-D_2-H_2-T_2 // Физика металлов и металловедение. – 1992. – № 6. – С. 138–143.
95. Способ получения рентгеновского излучения и устройство для его осуществления // Патент РФ RU 24540840 C2 от 27 июня 2012 г. Авторы: Корнилова А. А., Высоцкий В. И., Сысоев Н. Н., Десятов А. В.
96. Высоцкий В. И., Корнилова А. А. Ядерный синтез и трансмутация изотопов в биологических системах. – М.: Мир, 2003. – 302 с.
97. Висоцький В. І. Квантова механіка та її застосування в прикладній фізиці. Підручник, видавництво Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ. – 2008. – 358 с.

98. Высоцкий В. И., Корнилова А. А., Высоцкий М. В. Особенности и механизмы генерации нейтронов и других частиц в первых экспериментах по лазерному синтезу // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 158. – Вып. 4(10). – С. 645–651. DOI: 10.31857/S0044451020100077.
99. Высоцкий В.И., Корнилова А.А., Василенко А.О. и др. Обнаружение и исследование аномальных (незатухающих) тепловых волн // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 196–206.
100. Корнилова А. А., Высоцкий В. И., Сапожников Ю. А. и др. Проблема и реализация устойчивой генерации альфа-частиц дейтерированным титаном, находящимся в поле тепловой волны // Инженерная физика. – 2018. – № 5. – С. 3–12.
101. Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Hagelstein P. L. Distant Behind-screen Action of Undamped Temperature Waves (Long-distance Propagation, X-ray Generation, LENR Stimulation) // Journal of Condensed Matter Nuclear Science. – 2020. – Sci. 33. Pp. 296–304.
102. Высоцкий В. И., Корнилова А. А., Высоцкий М. В. Горячий лазерный термояд или низкотемпературные ядерные реакции? Анализ и перспективы первых экспериментов по лазерному синтезу // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2021. – Т. 13. – № 1. – С. 59–70.
103. Высоцкий В. И., Высоцкий М. В. Особенности бездиссипативного каналирования движущихся заряженных частиц около проводника с током // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 159. – Вып. 1. – С. 25–34.
104. Исследования альтернативной навигации для высоких широт на мюонах// Онлайн журнал Вестник GLONASS. – Технологии. – 10.12.2021.– URL: http://vestnik-glonass.ru/news/tech/issledovaniya-alternativnoy-navigatsii-dlya-vysokikh-shirot-na-myuonakh/?ysclid=lmdkrt9n9p371096826 (дата обращения: 10.09.2023)
105. Positrino Final Review. Positioning, Navigation and Timing using Neutrino Particles: электронная презентация доклада по программе 014-PNT USING NEUTRINO PARTICLES / ESA (EUROPEAN SPACE AGENCY). NAVISP (Navigation Innovation and Support Programme): 2020. – URL: https://navisp.esa.int/uploads/files/project_documents/POSITRINO_T0+12_FR_v1.0_Final_ESA.pdf?v=349699 (дата обращения: 25.12.2022).
106. Executive summary report. Positrino: электронный отчёт по программе 014-PNT USING NEUTRINO PARTICLES / ESA (EUROPEAN SPACE AGENCY). NAVISP (Navigation Innovation and Support Programme): 2020. – URL: https://navisp.esa.int/uploads/files/project_documents/NAVISP1-ESR-GMV-014_1.0.pdf?v=349699 (дата обращения: 25.12.2022).
107. Compact Fusion. Lockheed Martin Corporation: видеофильм 00:03:58 (время воспроизведения). – URL: https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/compact-fusion.html (дата обращения: 25.12.2022).
108. Introducing TAE Power Solutions, a power management spin-off company from fusion energy leader TAE Technologies. January 2023: электронный отчёт.– URL: https://tae.com/introducing-tae-power-solutions-a-power-management-spin-off-company-from-fusion-energy-leader-tae-technologies (дата обращения: 25.12.2022).
109. Cooperative Patent Classification. Scheme-G21B, scheme-G21C, scheme-G21D. – URL: https://www.cooperativepatentclassification.org/ cpcSchemeAndDefinitions/table (дата обращения: 25.12.2022)
110. The global fusion industry in 2021. FIA (Fusion Industry Association) Report. – URL: https://drive.google.com/file/d/17lrqxt6NG0-QjVafJ_WHbT43kSGiK-WD/view (дата обращения: 10.09.2023).
111. The global fusion industry in 2022. FIA (Fusion Industry Association) Report // – URL: https://www.fusionindustryassociation.org/about-fusion-industry (дата обращения: 10.09.2023).
112. Ратис Ю.Л. Управляемый «термояд» или холодный синтез? Драма идей. Самара, Издательство Самарского научного центра РАН, 2009, 92 с.: ил. ISBN 978-5-93424-408-9. – URL: http://www.electrosad.ru/files/LENR/cold.pdf?ysclid=lmdmsyjug
3949136733 (дата обращения: 10.09.2023)
113. Neutrinovoltaic технология / Сайт Neutrino Energy Group // URL: https://www.neutrino-energy.info/neutrinovoltaic.
114. Браже Р. А., Кочаев А. И., Мефтахутдинов Р. М.. Графены и их физические свойства. Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – 139 с.
115. Ю.Е. Лозовик Проблемы и достижения современной нанофизики: электронная презентация. 77 слайдов.– https://mipt.ru/abiturs/schools/leto/upload/350/lozovik-arpgqnor658.pdf (дата обращения: 25.12.2022)
116. Безруков Л. Б., Заварзина В. П., Курлович А. С. и др. Об отрицательно заряженном слое электрического поля Земли // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 480. – № 2. – С. 155–157.
117. Безруков Л. Б., Заварзина В. П., Карпиков И. С. и др. Интерпретация результатов измерения разности потенциалов в озере Байкал // Геомагнетизм и аэрономия. – 2019. – Т. 59. – № 5. – С. 666–670.
118. Fiorentini G., Lissia M., Mantovani F. Geo-neutrinos and Earth's interior // ArXiv: 0707.3203. – URL: https://arxiv.org/list/physics.geo-ph/new (архив открытого доступа Корнелльского университета (Cornell University, США).
119. Громов М.Б., Чепурнов А.С. Нейтринный детектор BOREXINO в эру многоканальной астрономии // Ломоносовские чтения. МГУ. 22–23 апреля 2019 г. Материалы: Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ. – URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/lom/l14.htm (дата обращения: 25.12.2022).
120. Болоздыня А. И. Введение в ядерную физику. Лекция №11. Лептоны: электронная презентация. 2017. / архив электронных версий лекций МТФИ. – URL: https://enpl.mephi.ru/download/lectures2/lect_11.pdf (дата обращения: 25.12.2022).
121. Akimov D., An P., Awe C., at al. The COHERENT Experiment at the Spallation Neutron Source // Архив открытого доступа Корнелльского университета (Cornell University, США). 4 Apr 2016. – URL: arXiv:1509.08702v2 [physics.ins-det].

122. Budmir Klicek Measuring leptonic CP violation at the second neutrino oscillation maximum with ESSnuSB: электронная презентация. 70 слайдов. Архив ЦЕРН.– URL:https://indico.cern.ch/event/1145347/attachments/2425504/4152469/ESSnuSB_BK%20_CERN_Apr_2022_final.pdf (дата обращения: 25.12.2022).
123. Физики из MIT разработали портативный детектор мюонов ценой в $100 // Сайт компании Хабр.– URL: https://habr.com/ru/post/374015 (дата публикации: 21.11.2017).
124. Cosmich Watch is simple, physics-motivated machine- and electronics-shop project for university students and schools. – URL: http://cosmicwatch.lns.mit.edu/detector (дата обращения: 10.09.2023).
125. О'Нилл К., Джексон С. Использование кремниевых фотоумножителей B- и C-серий компании SensL для времяпролетной позитронно-эмиссионной томографии. // Фотоника. – 2014. – № 6 . – Вып. 48. – С. 70–79.
126. О'Нилл К., Павлов Н., Джексон К. Новый кремниевый фотоумножитель с быстродействующим выходом компании SensL // Фотоника. – 2013. – № 1. Вып. 37. – С. 76–84.
127. Shkel A. M. Micro-Technology for Positioning, Navigation and Timing (μPNT) // Speakers and Presentations of 2010 PNT Annual Symposium. Stanford University. Center for Position, Navigation and Time. – 2010. – URL: https://drive.google.com/file/d/1ojOWZZcfVfMzvarjUH1oHlql0BLakuQf/view?pli=1 (дата обращения: 25.12.2022).
128. User Guide Chip-Scale Atomic Clock (CSAC) SA.45s. Microchip. Microsemi Product Portfolio. – 2020. – URL: https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/135659-sa-45s-csac-user-guide (дата обращения: 25.12.2022).
129. Боровой А. А., Владимиров Д. М., Гаврилов С.Л., Зверев М. В., Лютостанский Ю. С. Возможности нейтринной диагностики при аварийных ситуациях на АЭС // Атомная энергия. – 1991. – Т. 70. – Вып. 6. – С. 386–388.
130. Климов М.А. И у кораблей есть уши // Независимое военное обозрение. Электронное издание. – 2007. – URL: https://nvo.ng.ru/armament/2007-01-12/6_ushi.html (дата обращения: 25.12.2022).
131. Герштейн С. С., Петров Ю. В., Пономарев Л. И. Мюонный катализ и ядерный бридинг // Успехи физических наук. – 1990. – Т. 160. – № 8. – С. 3–46. DOI: https://doi.org/10.3367/UFNr.0160.199008a.0003.
132. Зельдович Я. Б., Сахаров А. Д. О реакциях, вызываемых μ-мезонами в водороде // Успехи физических наук. Избранные труды. А.Д. Сахарова. – 1991. – Т. 161. – № 5. – С. 43–46
133. Амвросов В. В. Оценка чувствительности нейтринного детектора Байкал ГВД к регистрации нейтрино с энергиями в интервале от 100ТэВ до 10 ПэВ / Магистерская диссертация. Архив отрытого доступа МГУ. Физический факультет. – 2020. – URL: https://msu-dubna.ru/hep/pluginfile.php/429/course/section/78/master_thesis_amvrosov_updated_2%20%282%29.pdf (дата обращения: 25.12.2022).
134. Мюонная томография / Wikipedia. – URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.0f9f2643-63a539dc-f26567b4-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Muon_tomography (дата обращения: 25.12.2022).
135. Елсукова И., Бойко С. Мюонный томограф поможет заглянуть внутрь реактора на Калининской АЭС // Страна РОСАТОМ. Электронный журнал. 9 ноября 2022. URL: https://strana-rosatom.ru/2022/11/09/mjuonnyj-tomograf-pomozhet-zaglyanut-v (дата обращения: 25.12.2022).
136. Мюонный томограф разработки НИЯУ МИФИ начал работать на Калининской АЭС// Новости на сайте НИЯУ МИФИ. 24.10.2022 URL: https://mephi.ru/press/news/19479 (дата обращения: 25.12.2022).
137. Tanaka, H.K.M., Gluyas, J., Holma, M. et al. Atmospheric muography for imaging and monitoring tropic cyclones. Scientific Reports. – 2022. No 12 (1), 16710. – 15 p. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-20039-4
138. Лучков Б. Просвечивание пирамиды продолжается // Наука и жизнь (электронный архив). – 2008. – №6. – URL: https://www.nkj.ru/archive/articles/14135 (дата обращения: 25.12.2022)
139. Барбашина Н.С. Метод мюонографии и его применение для исследования гелиосферы, магнитосферы и атмосферы Земли: Автореф. дисс. на соискание уч. степ. докт. физ.-мат. н. Дата защиты 26.09.2022г. – 32 с. – URL: https://www.dissercat.com/content/metod-myuonografii-i-ego-primenenie-dlya-issledovaniya-geliosfery-magnitosfery-i-atmosfery (дата обращения: 25.12.2022).
140. Буланов А. Таинственный остов: мюоны помогут раскрыть загадки древних артефактов. Новый метод уже используют для изучения египетских пирамид и храма в Дербенте //Информационный портал газеты Известия. Наука и техника. 27 февраля 2019. – URL: https://iz.ru/839725/aleksandr-bulanov/tainstvennyi-ostov-miuony-pomogut-raskryt-zagadki-drevnikh-artefaktov (дата обращения: 25.12.2022).
141. Турчихин С. Мюонные детекторы CMS: дрейфовые трубки, катодные полосковые камеры, камеры с резистивными пластинами. Архив открытого доступа МГУ. Ядерная физика в интернете. Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ и отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ. Материалы студенческого семинара «Фотоядерные процессы». – 2018. – URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/students/md_dt/index.html (дата обращения: 25.12.2022).
142. Бецис Д. Акустические детекторы нейтрино. Архив открытого доступа МГУ. Ядерная физика в интернете. Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ и отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер НИИЯФ МГУ. Материалы студенческого семинара «Фотоядерные процессы». – 2018. URL: nuclphys.sinp.msu.ru/students/acustdet/index.html (дата обращения: 25.12.2022).
143. Левин А. Мюоны дают добро // Популярная механика. – 2013. № 3. Электронная версия. URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431926/Myuony_dayut_dobro (дата обращения: 25.12.2022).
144. Our Product. The next generation of non-intrusive inspection: описание разработок компании DSC. – URL: https://www.decisionsciences.com/products-solutions (дата обращения: 10.09.2023).

145. U.S. Navy International Science Challenge Global-X Awards Over $1 Million. Site U.S. Embassy in The Czech Republic. 24.09.2020 // https://cz.usembassy.gov/u-s-navy-international-science-challenge-global-x-awards-over-1-million (дата обращения: 25.12.2022).
146. Muon-based research could facilitate Arctic operations. Shephard News /Сайт электронного издания Shephard. – 24.11.2021. – URL: https://www.shephardmedia.com/news/defence-notes/muon-based-research-could-facilitate-arctic-operat (дата обращения: 25.12.2022).
147. Rasa D. The Navy is testing a GPS-like device that doesn't require satellites // Сайт электронного издания Task and Purpose. – 24.22.2021. – URL: https://taskandpurpose.com/news/navy-muon-navigation-arctic-circle (дата обращения: 25.12.2022).
148. Adde N. Calls grow to find back up systems for GPS // National Defense. – 11.02. 2021. – URL: nationaldefensemagazine.org/articles/2021/2/11/calls-grow-to-find-back-up-systems-for-gps (дата обращения: 25.12.2022).
149. DARPA инициировало программу по созданию портативного мюонного генератора // Сайт SecurityLab.ru. – 25.07.2022. URL: https://www.securitylab.ru/news/532940.php (дата обращения: 25.12.2022).
150. Keller J. DARPA extends deadline to investigate future muon particle beams for electromagnetic weapons and sensors // Электронное издание Military + Aerospace Electronics. – 03.10.2022. – URL: https://www.militaryaerospace.com/power/article/14283600/particle-beams-electromagnetic-weapons-sensors (дата обращения: 25.12.2022).
151. Pentagon wants to see through concrete walls, deep underground chambers via DARPA Muons for Science & Security program // Электронное издание The Sociable. – 27.07.2022. URL: https://sociable.co/military-technology/pentagon-see-concrete-walls-underground-chambers-darpa-muons (дата обращения: 25.12.2022).
152. Muons for Science and Security (MuS2) Proposers Day // SAM.gov. Официальный сайт правительства США. – 22.07.2022. URL: https://sam.gov/opp/83e9b6d1c5614d2e9545ed898b8f3cf0/view (дата обращения: 25.12.2022).
153. Bronson A. DARPA объявило о поиске подрядчика для разработки портативного мюонного генератора // Сайт Хабр. – 22.07.2022. URL: https://habr.com/ru/news/t/678910 (дата обращения: 25.12.2022).
154. Wang B. DARPA Muon Scanner to Search for Tunnels or Monitor Volcanoes // Blog Nextbigfuture.com. – 05.09.2022. – URL: https://www.nextbigfuture.com/2022/09/darpa-muon-scanner-to-search-for-tunnels-or-monitor-volcanoes.html (дата обращения: 25.12.2022).
155. Lockheed Martin Delivers Its Highest Powered Laser To Date To U.S. Department Of Defense // Lockheed Martin Website. – 15.09.2022. URL: https://news.lockheedmartin.com/2022-09-15-Lockheed-Martin-Delivers-Its-Highest-Powered-Laser-to-Date-to-US-Department-of-Defense (дата обращения: 25.12.2022)
156. Энергорезонатор Neutrino Power Cube: мир без ископаемого топлива всё ближе: электронное издание. Архив статей. – 08.09.2023.– https://neutrino-energy.com/russian-newsroom (дата обращения: 10.09.2023).
157. Dittmar M. The Future of Nuclear Energy: Facts and Fiction:Chapter I: Nuclear Fission Energy Today // Архив открытого доступа Cornell University, USA ArXiv: 0908.0627v1, physics.soc-ph. – 05.08.2009. – 16 p. URL: https://arxiv.org/pdf/0908.0627v1.pdf (дата обращения: 25.12.2022).
158. Dittmar M. The Future of Nuclear Energy: Facts and Fiction Chapter II: What is known about Secondary Uranium Resources? // Архив открытого доступа Cornell University, USA. ArXiv: 0908.3075v1, physics.soc-ph. – 21.08.2009. – 10 p. URL: https://arxiv.org/pdf/0908.3075v1.pdf (дата обращения: 25.12.2022).
159. Dittmar M. The Future of Nuclear Energy: Facts and Fiction Chapter III: How (un)reliable are the Red Book Uranium Resource Data? // Архив открытого доступа Cornell University, USA. ArXiv: 0909.1421v1, physics.soc-ph. – 08.09.2009. – 20 p. URL: https://arxiv.org/pdf/0909.1421v1.pdf (дата обращения: 25.12.2022).
160. Dittmar M. The Future of Nuclear Energy: Facts and Fiction Chapter IV: Energy from Breeder Reactors and from Fusion? // Архив открытого доступа Cornell University, USA. ArXiv: 0911.2628v1, physics.soc-ph. – 13.11.2009. – 29 p. URL: https://arxiv.org/pdf/0911.2628.pdf (дата обращения: 25.12.2022).
161. Хелман К. Как калифорнийский единорог с участием Чубайса хочет заменить Солнце // Forbes.ru. – 22.05.2019. URL: https://www.forbes.ru/tehnologii/376469-kaliforniyskiy-edinorog-s-uchastiem-chubaysa-hochet-zamenit-solnce (дата обращения: 25.12.2022).
162. Арцимович Л.А. Избранные труды. Атомная физика и физика плазмы. – М.: «Наука», 1978. – 304 с.

ACHIEVEMENTS OF NUCLEAR PHYSICS IN THE LIGHT OF SOLVING THE PROBLEM OF DETERMINING THE LOCATION OF A MOVING OBJECT USING RELATIVISTIC PARTICLES

A. P. Stepanov (Concern «Electropribor», ITMO University)

The achievements of nuclear physics and related applied fields of science and technology are considered in the light of the possibility of their application to increase noise immunity, accuracy and autonomy of determining and clarifying the location of mobile objects. Data on existing developments and their application are provided. The probable prospects for the development of this direction are considered.

ГИДРОГРАФИЯ И МОРСКАЯ КАРТОГРАФИЯ

УДК 551.46+347.79

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ ВНЕШНЕЙ ГРАНИЦЫ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В ПЕРИОД 1998–2023 гг.

В. Ю. БАХМУТОВ, Е. А. ГОРДЕЕВА Е. В. КОЛОБОВ,
А. В. КОСТЕНИЧ, К. Г. СТАВРОВ (АО «ГНИНГИ»)

Описываются основные результаты гидрографических исследований, выполненных под руководством и при участии ученых и специалистов Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института, в интересах обоснования внешней границы континентального шельфа России в Арктике за последние 25 лет.

Прошло 25 лет с момента утверждения в 1998 г. Министром природных ресурсов и экологии России и Министром обороны России первой совместной «Программы работ по подготовке географических координат точек, определяющих линии внешних границ континентального шельфа (ВГКШ) Российской федерации в Северном Ледовитом и Тихом океанах, и их обоснованию» (далее Программа). Программа была разработана в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 16.06.97 г. № 717 «О порядке утверждения перечней географических координат точек, определяющих линии внешних границ континентального шельфа Российской Федерации», возлагающим работы по сбору и обработке необходимых исходных данных и обоснованию положения ВГКШ России на Минприроды и Минобороны России. Указанная Программа была согласована начальником Главного управления навигации и океанографии МО РФ. Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт (ГНИНГИ) был определен головной гидрографической организацией. Указанное постановление Правительства РФ было издано в целях реализации положений Конвенции ООН по морскому праву (1982 г.) (далее Конвенция) и Федерального закона от 30.11.1995 № 187-ФЗ «О континентальном шельфе Российской Федерации» [1–3].

В соответствии с Конвенцией (ст. 76) прибрежные государства, имеющие расширенный континентальный шельф, определяют зону своей юрисдикции внешней границей континентального шельфа (ВГКШ), если таковая расположена за пределами Исключительной экономической зоны (ИЭЗ). Для определения ВГКШ введены соответствующие правила и ограничения, в соответствии с которым и положение ВГКШ за пределами ИЭЗ обосновывается на основе гидрографических (батиметрических) данных о рельефе дна и геолого-геофизических данных о толщине

донных осадочных пород [4]. Заявка прибрежного государства с обоснованием положения ВГКШ рассматривается в Комиссии ООН (по границам континентального шельфа).

В декабре 2001 г. Россия стала первым государством, направившим Генеральному Секретарю ООН подготовленную в соответствии с требованиями Конвенции заявку «Предложения о перечнях географических координат точек, определяющих линии внешней границы континентального шельфа Российской Федерации» (далее «Заявка») [4, 5].

При подготовке этой Заявки основу исходных натурных данных составили материалы исследований Высокоширотной воздушной экспедиции (ВВЭ) «Север», проводившейся на дрейфующем льду авиадесантным способом Гидрографической службой Военно-Морского флота (ГС ВМФ) совместно с геологическими организациями ежегодно начиная с 1960 г. [6]. Все виды гидрографических и геофизических работ ВВЭ «Север» были взаимосвязаны и направлены, в первую очередь, на изучение рельефа дна. В результате точечными площадными сейсмозондированиями и однолучевым промером была покрыта практически вся центральная часть Северного Ледовитого океана (СЛО), что позволило своевременно создать коллекцию навигационных карт, обеспечивших безопасность плавания подо льдом. Для определения геологических параметров среды и увязки между собой данных площадной съемки со льда проводились также базовые сейсмические наблюдения методами отраженных и преломленных волн и другие геофизические исследования.

Все эти материалы, а также карта рельефа дна СЛО и орографическая карта Арктического бассейна, составленные на основании материалов промера и сейсмических зондирований, были использованы при подготовке Заявки, в частности, для определения положения подножия континентального склона (ПКС), относительно которого определяется ВГКШ. Так как исходные данные значительно различались по точности навигационной привязки, для определения точек ВГКШ использовались батиметрические профили, построенные методом билинейной интерполяции, как правило, ортогонально линии ПКС.

14 июня 2002 г. по результатам рассмотрения Заявки Комиссией ООН по границам континентального шельфа были приняты Рекомендации по подготовке и представлению пересмотренной заявки Российской Федерации по Северному Ледовитому океану. В части данных о рельефе дна основные рекомендации сводились к необходимости представления цифровых значений глубин с координатной привязкой.

Исходя из Рекомендаций Комиссии ООН была продолжена подготовка дополнительных материалов гидрографических и геолого-геофизических исследований в интересах обоснования ВГКШ России в Арктике. Для этого в 2009 г. решением Правительства РФ Государственным заказчиком работ было определено Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). По заказу Роснедра в 2009 г. АО «ГНИНГИ» разработало Технический проект на выполнение дополнительных экспедиционных гидрографических и геофизических работ по определению и обоснованию ВГКШ РФ в СЛО, в котором были учтены положения Конвенции методических документов Комиссии ООН [1, 7].

В соответствии с этим Техническим проектом в 2010–2014 гг. АО «ГНИНГИ» совместно с организациями Роснедра (ВНИИОкеангеология, Севморгео, МАГЭ и др.)

при участии специалистов коммерческих геологических организаций провело ряд экспедиций по проблеме ВГКШ на НЭС «Академик Фёдоров» под проводкой атомного ледокола.

Для осуществления этих исследований в 2010 г. на верфи TRY (Финляндия) было осуществлено дооборудование НЭС «Академик Фёдоров»: в 2010 г. – современным гидрографическим комплексом на базе многолучевого эхолота EM 122 (фирмаKongsberg, Норвегия), а в 2011 г. – оригинальным буксируемым сейсморазведочным комплексом морского арктического исполнения (фирма ION-GXT, США). Помимо систематических гидрографических съемок, в центральной части СЛО по заказу Роснедра в отдельных районах проводились комплексные геолого-геофизические исследования, включая геологическое опробование с использованием научно-исследовательской подводной лодки (экспедиция «Шельф-2012»), в которых АО «ГНИНГИ» осуществляло навигационно-гидрографическое обеспечение. Всего за период 2010–2014 гг. было исследовано более 35 тысяч линейных километров с получением уникальных гидрографических и геофизических данных в наиболее труднодоступных районах СЛО (в 2010 г. – 13300 км; в 2011 г. – 11640 км; в 2014 г. – 10520 км съемки рельефа дна) [8–10].

Комплексная обработка гидрографических данных по Центральному Арктическому бассейну, выполненная специалистами ГНИНГИ по технологиям, рекомендованным Комиссией ООН [7], с использованием оригинального программного обеспечения [11, 12], позволила дополнить ретроспективную базу батиметрических данных ГС ВМФ как отечественными данными многолучевой съёмки на НЭС «Академик Федоров», так и данными многолучевых съемок на ледоколе «Хили» (США), однолучевых съемок иностранных судов, включая базу данных съёмок рельефа дна подводными лодками по программе SCICEX (США) [13]. Разработанная в ГНИНГИ технология совмещения в единый массив разнородных данных о глубинах позволила создать отечественную цифровую модель рельефа дна СЛО (RuBCAO), а проведенный на основе этой модели анализ международной базы арктических данных IBCAO [13] дал возможность выявить ряд неточностей IBCAO для российского сектора, примеры которых приведены в работе [14].

Материалы экспедиционных гидрографических работ в Арктике, выполненных под руководством и при участии АО «ГНИНГИ», были включены в «Частично пересмотренное представление в отношении расширения континентального шельфа России в Северном Ледовитом океане» (далее Представление), подготовленное совместно с морскими геологическими государственными и организациями Роснедра и представленное на рассмотрение Комиссии ООН 3 августа 2015 г.

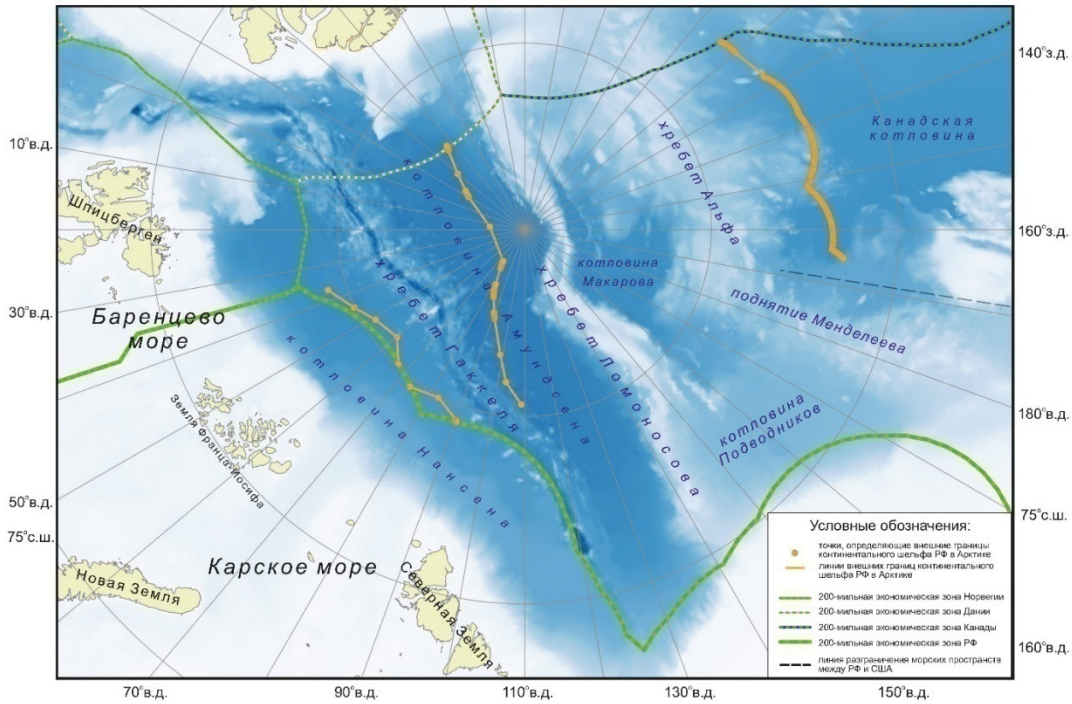
В результате рассмотрения Представления в специальной подкомиссии в 2015–2019 гг. был сформулирован ряд новых вопросов, касающихся в основном разработанной российскими учеными геологической модели строения СЛО, а также определения линии ПКС в районе хребта Гаккеля. В связи с этим в июле – августе 2019 г. АО «ГНИНГИ» провело очередную экспедицию на НЭС «Академик Федоров» с использованием многолучевого и однолучевого эхолотов, акустического профилографа, буксируемого сейсмического комплекса с короткой косой и гравиметрического комплекса [15]. В результате были получены высококачественные комплексные гидрографические данные в недостаточно изученном ранее районе.

Рассмотрение материалов экспедиции в Комиссии ООН в феврале 2020 г. позволило сформулировать новые замечания и рекомендации, анализ которых показал

необходимость дополнительных комплексных батиметрических исследований, которые и были проведены АО «ГНИНГИ» в сложных ледовых условиях. Их общий объем составил около 15 тыс. лин. км [16].

На основании углубленного анализа данных, полученных экспедициями 2019 г. и 2020 г., с привлечением результатов дополнительных геолого-геофизических обоснований было подготовлено Дополнение к Представлению Российской Федерации от 3 августа 2015 г., которое было представлено в Комиссию ООН 31 марта 2021 г.

Закономерным результатом рассмотрения Представления РФ от 3 августа 2015 г. (с дополнением) стало признание подкомиссией (20 октября 2022 г.), а затем в целом Комиссией ООН предложений по ВГКШ России в центральной части Северного Ледовитого океана (см. рисунок) [17].



Внешние границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане в соответствии с документом ООН

Необходимо отметить, что АО «ГНИНГИ» также в соответствии с требованиями Комиссии ООН параллельно с использованием собственных технологий провело работы по обоснованию ВГКШ России в Тихом океане, что стало основанием для признания в 2014 г. ООН юрисдикции Российской Федерации в отношении центральной части Охотского моря.

Таким образом, основные задачи, поставленные в 1998 г. «Программой работ по подготовке географических координат точек, определяющих линии внешних границ континентального шельфа (ВГКШ) Российской федерации в Северном Ледовитом и Тихом океанах, и их обоснованию», утвержденной Минобороны и Минприроды России, в части гидрографических исследований успешно выполнены АО «ГНИНГИ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Международная Конвенция по морскому праву 1982 г. [Текст]: Конвенция Организации Объединенных Наций по морскому праву: [подписана 10 декабря 1982 г.: вступ. в действие 16 ноября 1994 г.]. – М.: «Военное издательство», 1985. – 224 с.
2. Федеральный закон от 26 февраля 1997 г. N 30-ФЗ "О ратификации конвенции Организации Объединенных Наций по морскому праву и соглашения об осуществлении части XI конвенции Организации Объединенных Наций по морскому праву" [Текст] / Российская газета, 1997, № 43–44 от 04.03.97 г.
3. Федеральный закон от 30 ноября 1995 г. № 187-ФЗ «О континентальном шельфе Российской Федерации» (в ред. от 10.02.99 г.) [Текст] //Российская газета. 1995, № 237 от 07.12.95 г.; Российская газета, 1999, № 30 от 17.02.99 г.
4. Научно-техническое Руководство Комиссии по границам континентального шельфа. Пятая сессия. Нью-Йорк, 3–14 мая 1999 г. – 90 с.
5. 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.
6. Российские сейсмические исследования с дрейфующих льдов Северного Ледовитого океана. – СПб.: ГУНиО МО РФ, 1997. – 32 с.
7. TheLawof the Sea. Training Manual for delineation of outer limits of the continental shelf beyond 200 nautical miles and for preparation of submissions on the Limits of the Continental Shelf. United Nations Publication. – New York, 2006. – 632 p.
8. Зеньков А. Ф., Ставров К. Г. Итоги работы арктических экспедиций «Шельф2010» и «Шельф-2011» по получению дополнительных батиметрических и сейсмических данных для обоснования внешней границы континентального шельфа России в Северном Ледовитом океане // Российские полярные исследования. – 2013. – № 2 (12). – С. 20–23.
9. Алексеев С. П., Зеньков А. Ф., Ставров К. Г. Обоснование внешней границы континентального шельфа – приоритетная задача стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года // Труды научно-исследовательского отдела Института военной истории. Т. 9. Кн. 1. Обеспечение национальных интересов России в Арктике / ЗВО, ВА ГШ ВС РФ, Ин-т воен. истории, Гос. полярн. акад.– СПб.: 2014. – С. 116–117.
10. Бахмутов В. Ю., Костенич А. В., Ставров К. Г. Комплексные гидрографические исследования в Арктике для обоснования внешней границы континентального шельфа России // Тезисы докладов международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики». – Санкт-Петербург, 2–4 марта 2020 г.– СПб.: ААНИИ, 2020. – С. 110–113.
11. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012610193, Российская Федерация. Батиметрический профиль /Каврайский А. В., Костенич А. В., Ставров К. Г. и др.; правообладатель ОАО "ГНИНГИ" – № 2011618083; дата поступл.31.10.2011; дата регистр.10.01.2012.
12. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 201266050, Российская Федерация. Определение ПКС / Каврайский А. В., Костенич А. В., Ставров К. Г. и др.; правообладатель ОАО "ГНИНГИ" – №2012618627; дата поступл.10.10.2012; дата регистр. 21.11.2012.
13. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean: / maintained by: NOAA/NGDC & World Data Service for Geophysics. – URL: http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/arctic.html.
14. Гордеева Е. А., Костенич А. В., Колобов Е. В., Ставров К. Г. О подходе к созданию цифровой модели рельефа дна Арктического бассейна // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2017. – № 1 (111). – С. 57–61.
15. Бахмутов В. Ю., Колобов Е. В., Костенич А. В., Червякова Н. В., Жилин Д. М. Комплексные исследования в Северном Ледовитом океане в 2019 году // Навигация гидрография.– 2021. – № 62. –С. 33–45.
16. Бахмутов В. Ю., Колобов Е.В., Костенич А. В., Жилин Д. М., Шамшурина Н. В. Комплексные батиметрические исследования в Северном Ледовитом океане в 2020 году // Навигация и гидрография. – 2020. – № 60. – С. 55–67.
17. RecommendationsoftheCommissionontheLimitsoftheContinentalShelfinregardtoThePartialRevisedSubmissionMadeByThe Russian Federation in respect of the Arctic Ocean on 3 August 2015 with addenda submitted on 31 March 2021. Recommendations prepared by the Subcommission established for the

consideration of the Submission made by the Russian Federation. Approved by the Subcommission on 20 October 2022. Approved by the Commission, with amendments, on 6 February 2023. – New York, 2023.

THE MAIN RESULTS OF HYDROGRAPHIC RESEARCH ON THE SUBSTANTIATION OF THE OUTER BOUNDARY OF THE CONTINENTAL SHELF OF THE RUSSIAN FEDERATION IN THE PERIOD 1998-2023

V. Yu. Bakhmutov, E. A. Gordeeva, E. V. Kolobov, A. V. Kostenich, K. G. Stavrov («GNINGI» JSC)

The main results of hydrographic research carried out under the guidance and with the participation of scientists and specialists of the State Research Navigation and Hydrographic Institute in the interests of substantiating the outer boundary of the continental shelf of Russia in the Arctic over the past 25 years are described.

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.515.2 556.113.2

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНАНА НА ФОРМИРОВАНИЕ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

И. В. ЛАВРОВА (РГГМУ, АО «ГНИНГИ»),
О. Н. ТОПТУНОВА (РГГМУ),
Т. Р. ШИШКИНА (РГГМУ, ФГБУ «Северо-западное УГМС»),
Е. Г. АЛЕКСЕЕВА, Ю. В. ЕФИМОВА (РГГМУ),

Температура поверхности океана (ТПО) относится к одному из главных факторов, оказывающих влияние на формирование и развитие тропических циклонов. Известно, что тропические циклоны формируются при ТПО выше 26 °С. В данной работе показано, что в момент возникновения циклонов существует и верхний предел температуры воды на поверхности – 31 °С. В таких случаях начинает работать другой фактор, отмечаются более высокие поля давления, и формирование циклонов не происходит. За последние 50 лет в северо-западной части Тихого океана в районе формирования тропических циклонов наблюдается повышение ТПО во все сезоны на 0,15–0,16 °С /10 лет. Если предположить, что тенденция в будущем будет сохраняться, то можно ожидать, что в летний период тропические циклоны будут формироваться значительно реже, с меньшей интенсивностью и продолжительностью.

Тропические циклоны (ТЦ) представляют большой интерес для исследований, они являются одновременно и важным элементом циркуляции атмосферы в тропиках, и обладают огромной разрушающей силой. В северо-западной части Тихого океана каждый год возникает от 14 до 36 ТЦ, из них около 10 % выходят на территорию Приморского края. С этими циклонами связаны такие опасные явления как интенсивные осадки, сильный ветер, волнение, подъем уровня воды.

Для начала проанализирован многолетний ход основных характеристик ТЦ северо-западной части Тихого океана, их количество, продолжительность и интенсивность по современным данным.

В ходе работы использованы данные по ТЦ из архива Гидрометцентра России с 1970 по 2011 гг. [1] для северо-западной части Тихого океана. За период с 2012 по 2022 гг. – данные с сайта Исследовательского центра Японского агентства аэрокосмических исследований [2]. Данные по температуре поверхности океана (ТПО) с 1970 по 2022 гг. выбраны из массива реанализа ERA5 [3] Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с пространственным разрешением 0,25° х 0,25°. Синоптические карты построены также по данным реанализа ERA5 [3].

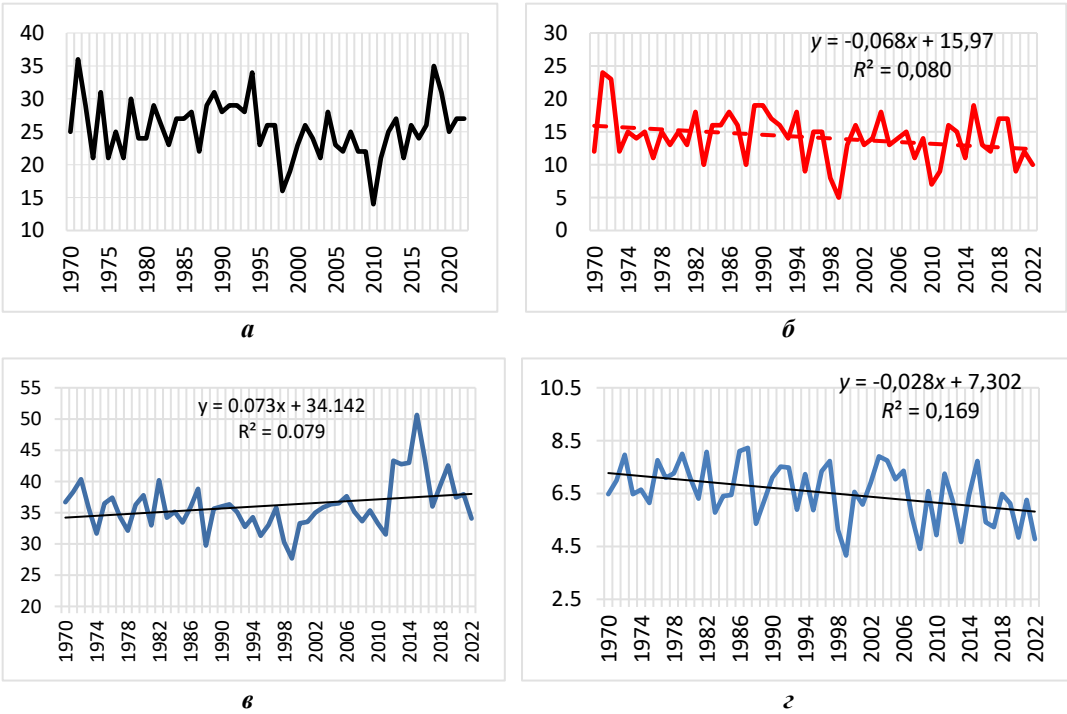


Рис. 1. Многолетняя динамика количества ТЦ и их характеристик: *а* – многолетний ход годового количества ТЦ; *б* – многолетний ход годового количества тайфунов; *в* – многолетний ход годовой максимальной скорости ветра в ТЦ (м/с); *г* – многолетний ход годовой продолжительности существования ТЦ (сутки)

На рис. 1*а* и 1*б* представлены многолетний ход количества ТЦ и тайфунов в среднем за год. Общее количество ТЦ имеет довольно большой разброс относительно среднего, и заметной тенденции здесь не отмечается. На рис. 1*б* линейный тренд показывает уменьшение количества тайфунов за рассматриваемый период. Среднегодовые значения максимальной скорости ветра (рис. 1*в*) возрастают, а также отмечается уменьшение средней продолжительности ТЦ (рис. 1*г*). Все тренды проверены на значимость по критерию Фишера и значимы на уровне 0,05. Таким образом, в последние годы количество тайфунов становится меньше, но увеличивается их интенсивность при небольшой продолжительности.

При большом разнообразии теорий возникновения ТЦ [4–7] в настоящее время известно несколько факторов, оказывающих влияние на их формирование и развитие: 1) высокая ТПО, более 26-27 °С; 2) неустойчивость атмосферы; 3) наличие силы Кориолиса, что исключает возможность образования тропического циклона вблизи экватора (2–3° ю. ш. – 2–3° с. ш.); 4) первоначальное циклоническое возмущения на нижних уровнях; 5) минимальный вертикальный сдвиг горизонтального ветра в районе формирования ТЦ; 6) высокие температуры воды до глубины 60 м; 7) высокая влажность воздуха в нижней и средней тропосфере; 8) повышенное поле давления в верхней тропосфере над приземным возмущением; 9) разность температур вода – воздух более 1–2 ºС.

Из всего множества факторов одним из главных считаются высокие значения ТПО. Согласно работе [4] поставляемая океаном скрытая теплота способствует поддержанию низкого давления в центре ТЦ. Считается, что чем выше ТПО, тем быстрее развивается тропический циклон и тем большей интенсивности он может достигнуть. В ряде работ, например в [4, 6], отмечается влияние температуры воды на траектории движения ТЦ, поскольку циклоны имеет тенденцию следовать над областями с повышенной температурой поверхности океана. А также от ТПО во многом зависит и мощность циклонов. В работах [4, 5] авторами отмечено, что в среднем при изменении температуры на 2 ºС максимальная скорость ветра в тропическом циклоне меняется на 50 %. В отдельных исследованиях авторы анализируют изменение ТПО после прохождения ТЦ [4, 8]. В данной работе проанализировано влияние ТПО именно в момент формирования ТЦ для акватории северо-западной части Тихого океана, а также показано, при каких значениях / ТПО они возникают.

Ниже представлено в виде таблиц число случаев с ТЦ (табл. 1), а также отдельно – с тропическими штормами (табл. 2) и тайфунами (табл. 3) по градациям ТПО в момент их зарождения для каждого месяца за весь период наблюдений (1970–2022 гг.). Считается, что тропический шторм – это ТЦ, у которого имеется более двух замкнутых изобар, а сила приземного ветра составляет 21–32 м/с. Тайфуном называют циклон, при котором скорость приземного ветра превышает 32 м/с [6].

Таблица 1. Число случаев с ТЦ по градациям ТПО в районах зарождения по месяцам

Градация ТПО, °С	Месяц года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
26–27							2	3		2	1	
27–28	2	2		4		5	8	14	6	3	7	5
28–29	13	3	13	16	21	20	59	93	87	65	44	23
29–30	2		2	8	21	38	85	92	97	80	37	15
30–31					5	6	8	8	10			1

Таблица 2. Число случаев с тропическими штормами ТЦ по градациям ТПО в районах зарождения по месяцам

Градация ТПО, °С	Месяц года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
26–27							2	3		2	1	
27–28	1	2		4		5	4	10	4	2	7	4
28–29	9		8	5	5	6	24	48	31	26	20	15
29–30	1		1	5	12	19	39	35	33	22	11	4
30–31					3	2		3	5			

Таблица 3. Число случаев с тайфунами по градациям ТПО в районах зарождения по месяцам

Градация ТПО, °С	Месяц года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
27–28	1						4	4	2	1		1
28–29	4	3	5	11	16	14	35	45	56	39	24	8
29–30	1		1	3	9	19	46	57	64	58	26	11
30–31					2	4	4	5	5			1

Из таблиц видно, что ТЦ возникают в тех районах северо-западной части Тихого океана, где ТПО достигает до значений от 26 до 31 °С. Большая часть из них образуется при температуре воды 28–30°С. При этом тайфуны (табл. 3) начинают формироваться при более высоких ТПО – от 27 °С и выше, тогда как тропические шторма – уже при 26 °С. Максимум приходится на градацию 29–30 °С в летний период и 28–30 °С – в зимний.

О том, что ТЦ формируются при температурах более 26 °С, известно давно, но из табл. 1–3 также видно, что существует и верхний предел температур – 31 °С, т. е. ТЦ не образуются при ТПО более 31 °С. Возможно, такие температуры в этом районе встречаются крайне редко. Проанализируем повторяемость ТПО в районе формирования ТЦ. Для исследования выбран район, где возникает более 90 % всех ТЦ, – от 5° до 25° с. ш. и от 110 до 170° в. д. (рис. 2).

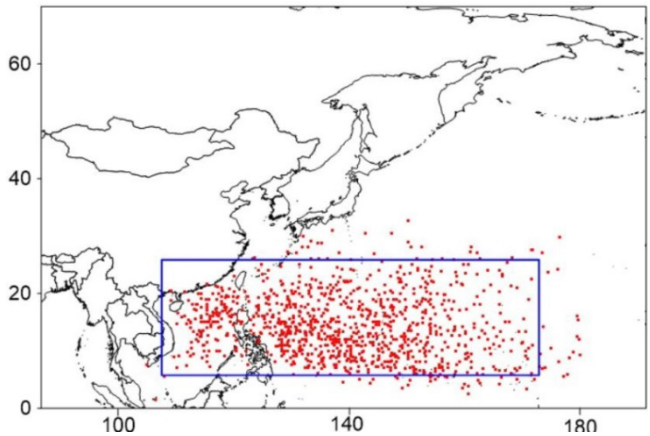


Рис. 2. Район зарождения тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана

По данному району рассчитана повторяемость ТПО по градациям для каждого месяца, результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Повторяемость ТПО по градациям в районе зарождения ТЦ

Градация ТПО, °С	Месяц года											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
16–17	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17–18	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18–19	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
19–20	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
20–21	0,3	0,4	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
21–22	0,7	1,4	1,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3
22–23	2,5	3,8	3,4	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6
23–24	5,8	6,3	5,8	3,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	2,0
24–25	8,5	8,1	8,0	5,4	1,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	1,0	5,2
25–26	11,0	10,5	10,9	8,2	4,6	0,6	0,0	0,0	0,0	0,5	3,6	8,9
26–27	17,6	18,4	18,0	14,0	9,2	2,6	0,2	0,2	0,4	2,7	8,5	13,6
27–28	27,6	24,8	27,8	23,0	18,2	10,1	4,7	4,0	4,3	9,9	17,1	24,1
28–29	20,9	14,4	20,4	29,2	31,8	31,5	34,2	36,8	34,2	38,3	36,4	31,2
29–30	4,4	2,4	3,8	11,8	27,8	42,3	51,0	50,4	49,1	44,2	27,9	13,3
30–31	0,0	0,0	0,0	0,6	5,7	9,2	9,7	8,4	8,6	4,2	1,7	0,3
31–32	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0

Из табл. 4 видно, что температуры более 31 °С в районе зарождения ТЦ встречаются, хоть и с небольшой повторяемостью (менее 1 %). Тем не менее примерно такую же повторяемость в июле и августе имеет градация 26–27 °С, при такой температуре по нашей выборке за два месяца (июль – август) сформировалось пять тропических штормов (табл. 3).

Чтобы понять причину, проанализируем районы, в которых фиксировался прогрев выше заданного предела ТПО, и синоптические ситуации, при которых он наблюдался.

На рис. 3 показано распределение количества случаев прогрева ТПО более 31 °С в районах зарождения ТЦ по месяцам с апреля по сентябрь. Зона высоких температур сдвигается от экватора, занимая наиболее северное положение в июле и августе. Одновременно это происходит при сезонном усилении и смещении Северо-Тихоокеанского антициклона. Так, по данным Н. П. Смирнова [9], максимальное давление в центре антициклона и наиболее северное его положение (38 с. ш.) наблюдается в июле и августе. Максимум ТПО отмечается в Восточно-Китайском и Филиппинском морях.

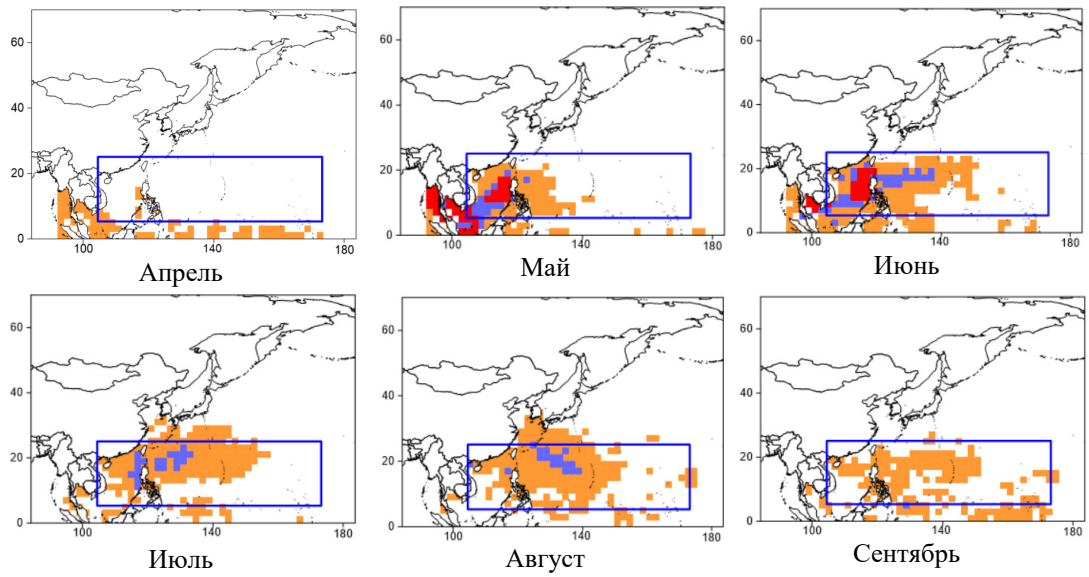


Рис. 3. Распределение случаев с температурой воды более 31 °С. Оранжевый – более одного случая, синий – более 50, красный – более 100 по квадратам 2°×2°

Проанализируем синоптические ситуации, при которых возникают такие высокие аномалии ТПО. Рассмотрим случаи 25.07.2022 г. и 16.08.2017 г., при которых температура воды поднималась выше 31°С.

Приземные карты за 25.07.2022 г. 00UTC и 16.08.2017 г. 00 UTC приведены на рис. 4*а* и 4*б*.

25.07.2022 г. 00 UTC на гребне субтропического антициклона сформировался новый антициклон с центром 20° с. ш., 160° в. д. с давлением 1021 гПа. Область аномально положительных ТПО расположена рядом с вершиной гребня со значениями выше 30,9 °С (рис. 4*б*) и максимумом 31,5 °С. Давление в этом районе составляет около 1010 гПа.

С 13 по 18 августа 2017 г. в течение пяти дней сохранялись аномально высокие температуры выше 31,5°С в районе зарождения ТЦ. На рис. 4*в* приведена приземная карта за 16.08.2017 г. 00 UTC. Зона максимальных температур (рис. 4*г*) так же, как и в предыдущем случае, находится вблизи вершины субтропического гребня с давлением около 1010 гПа в малоградиентном поле. После отступления барического гребня на месте, где наблюдались температуры более 31,5°С, начинает формироваться ТЦ, но в этот момент поверхность океана остывает, и температура опускается ниже 30°С.

На отдельных примерах видно, что между полем ТПО и давления существует тесная связь. Высокие температуры воды часто отмечаются при повышенном давлении. Поэтому в тех случаях, когда поверхность океана прогревается до 31°С и более, формирование ТЦ не происходит. Этот фактор, безусловно, не единственный, но, возможно, решающий.

Важно отметить, что полученные выводы справедливы только для момента формирования ТЦ. Так, в отдельных работах описывается прохождение уже сформировавшихся ТЦ по акваториям с экстремально высокими температурами, и при этом отмечается значительное их усиление [4]. Например, в 1969 г. в Карибском море и Мексиканском заливе небывалую мощность получил ураган на одном из этапов

развития, когда проходил над водой с температурой около 32 °С. Между тем средняя многолетняя ТПО в это время года на этом участке составляет меньше 29 °С [4].

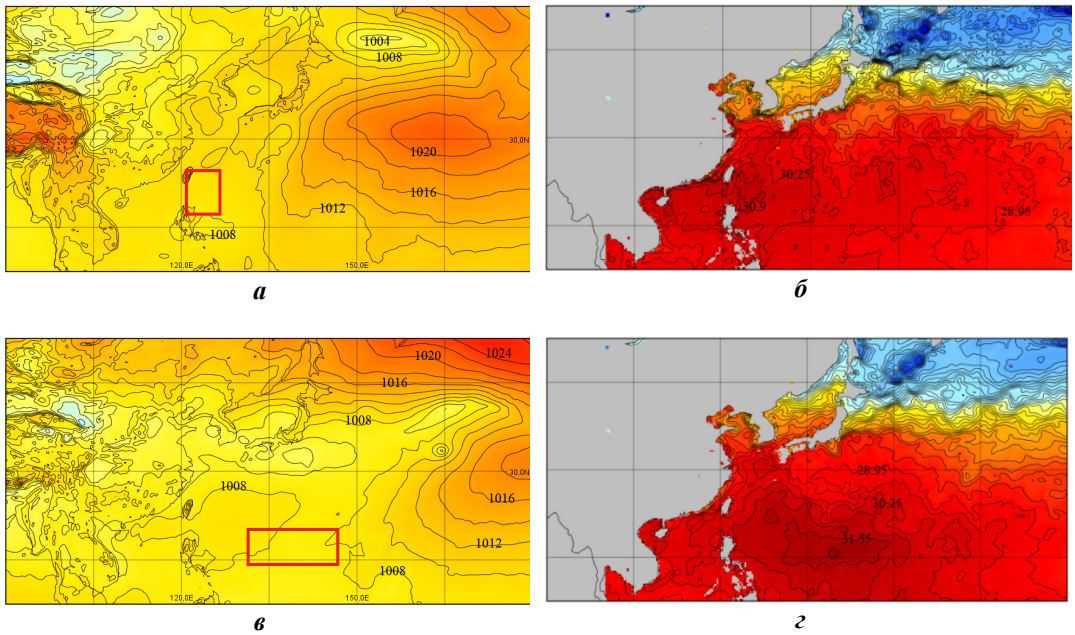


Рис. 4. Синоптические ситуации при аномально высоких ТПО (более 31°С):
***а* – приземная карта за 25.07.2022 г. 00 UTC; *б* – ТПО (°С) за 25.07.2022 г. 00 UTC;**
***в* – приземная карта 16.08.2017 г. 00 UTC; *г* – ТПО (°С)16.08.2017 г. 00 UTC**

Для дальнейшего исследования связи ТПО и давления на уровне моря, а также их влияния на ТЦ выберем и проанализируем периоды, в которые наблюдались аномально положительные и отрицательные ТПО. Для анализа рассмотрим август, когда температура воды наиболее высокая и отмечается наибольшее число тропических циклонов. Для этого с помощью метода k-средних кластерного анализа разобьем поля аномалии ТПО только по району формирования ТЦ (рис. 2) за весь рассматриваемый период (1970–2022 гг.) на пять типов. Из всех полученных типов проанализируем и сравним только два – с аномально высокими и аномально низкими ТПО.

В первый тип со значительными положительными аномалиями ТПО (0,7–0,9 °С) в районе формирования и прохождения циклонов на величину более чем 0,5 °С вошли 1988, 1995, 2001, 2003, 2005, 2007, 2008, 2009, 2013, 2014, 2015, 2019, 2021 гг. При этом в восточной части Тихого океана у экватора наблюдаются отрицательные аномалии ТПО (рис. 5*а*). Аномалии давления имеют положительный знак (рис. 5*в*).

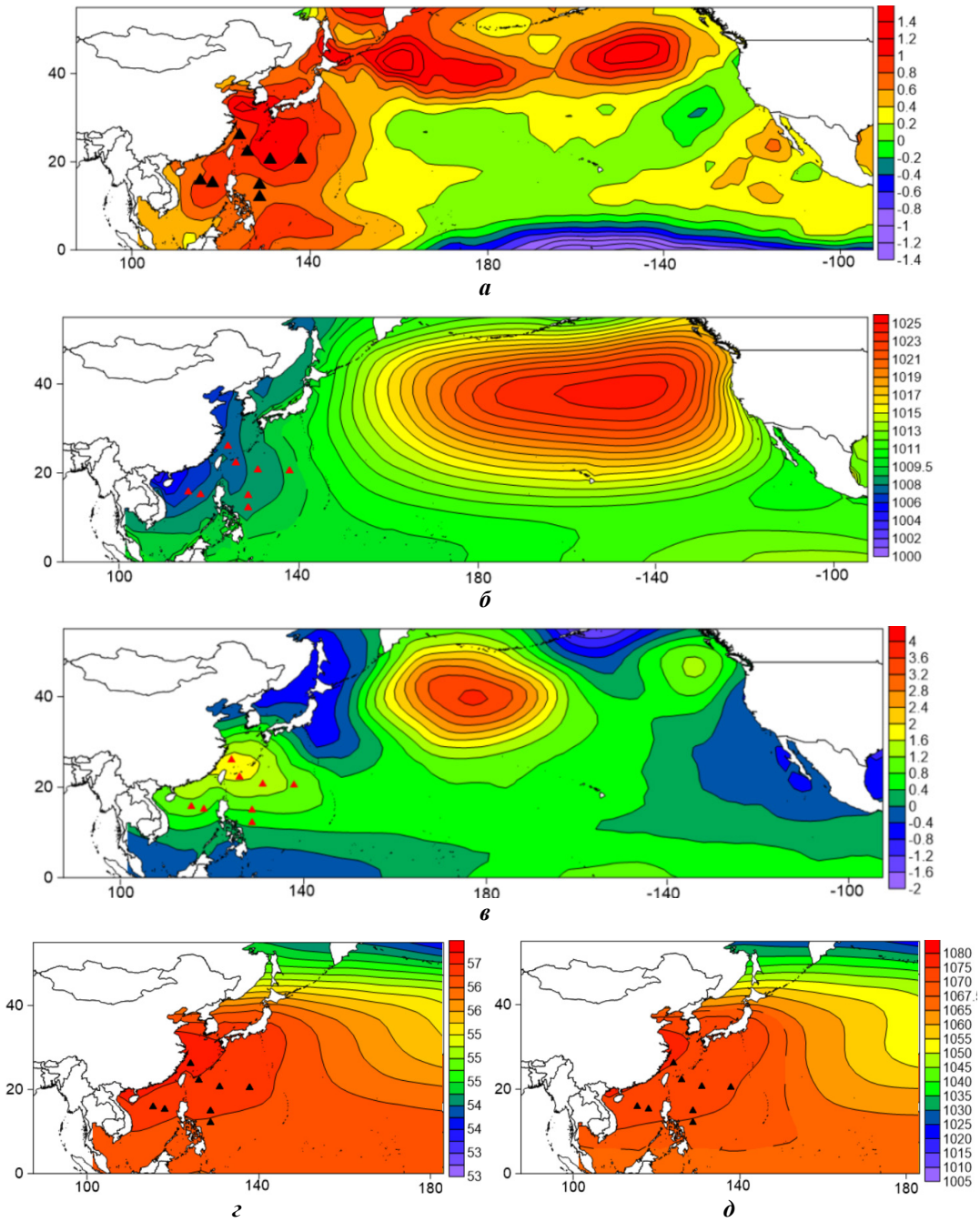


Рис. 5. Первый тип с аномально высокими ТПО: *а* – аномалии ТПО (°С), *б* – давление на уровне моря (гПа); *в* – аномалии давления на уровне моря (гПа); *г* – ОТ500/1000 (гп. дам.); *д* – ОТ250/1000 (гп. дам.). Треугольниками показаны районы зарождения тропических циклонов

Несмотря на активность в летнее время Тихоокеанского антициклона, здесь большое влияние также оказывает область пониженного давления, распространяющаяся от побережья Китая с континента (рис. 5*б*). Летом эти две области высокого и низкого давления работают в связке, создавая то повышенное, то пониженное давление в зоне формирования циклонов. При высоких ТПО барический гребень Тихоокеанского антициклона вытягивается на северо-запад, прижимая ложбину ближе к побережью Китая, сужая район формирования ТЦ.

Для анализа распределения поля температуры на высотах приведены карты ОТ500/1000 и ОТ250/1000 (рис. 5 *г*, *д*). Первая карта показывает распределение поля температуры в нижней половине тропосферы, вторая – во всей тропосфере. Высокие температуры воды приводят к повышению температуры воздуха во всей толще тропосферы. На картах ОТ обширный гребень тепла находится в северо-западной части Тихого океана, вытягиваясь с запада на восток (рис.5 *г, д*).

Периоды с высокими аномалиями ТПО в районе зарождения характеризуются в среднем наибольшим количеством тропических штормов (12), и меньшим числом тайфунов (10). Средняя минимальная глубина ТЦ составляет 968,7 гПа, что меньше обычного на 5,7 гПа. Максимальная скорость ветра в среднем – 35,8 м/с, при норме – 36,2м/с. Продолжительность – 5 суток, при средней продолжительности– 6,6 суток. Отмечаются наиболее высокие широты зарождения ТЦ первого типа – 16° с. ш., и немного западнее обычного (около 130° в. д.). 100% ТЦ первого типа из рассматриваемого периода заполняются над сушей.

Во второй тип со значительными отрицательными аномалиями ТПО в северо-западном районе Тихого океана (-0,4 – -0,8 °С) (рис. 6*а*) вошли1972, 1975, 1976, 1978, 1982, 1985, 1986, 1989 гг. Отрицательные аномалии ТПО отражаются на поле давления отрицательными аномалиями (рис. 6*в*). Барический гребень Тихоокеанского антициклона ослабевает, усиливается область низкого давления с континента (рис.6*б*). На картах ОТ500/1000 и ОТ250/1000 (рис. 6*г*, *д*) температуры значительно меньше по сравнению с первым типом. За эти годы образовалось наибольшее количество ТЦ и тайфунов.

При втором типе количество тайфунов значительно превышает количество тропических штормов. В среднем 10 тропических штормов и 17 тайфунов образуется за месяц. В этот период возникали наиболее интенсивные и продолжительные ТЦ со средней глубиной 961,8 гПа и максимальной скоростью ветра в среднем39,1 м/с. Кроме того, тропические циклоны второго типа зарождаются в более низких широтах (13,7° с. ш.) и восточнее (долгота зарождения – около 140° в. д.). Средняя продолжительность ТЦ больше, чем при высоких температурах ТПО и составляет 7,2 суток. 79,2 % ТЦ второго типа заканчивают свой жизненный цикл над сушей, 20,8 % – в океане.

Это подтверждает, что в целом при высоких значениях ТПО отмечается поле более высокого давления. Формируется меньше ТЦ с меньшей интенсивностью и продолжительностью.

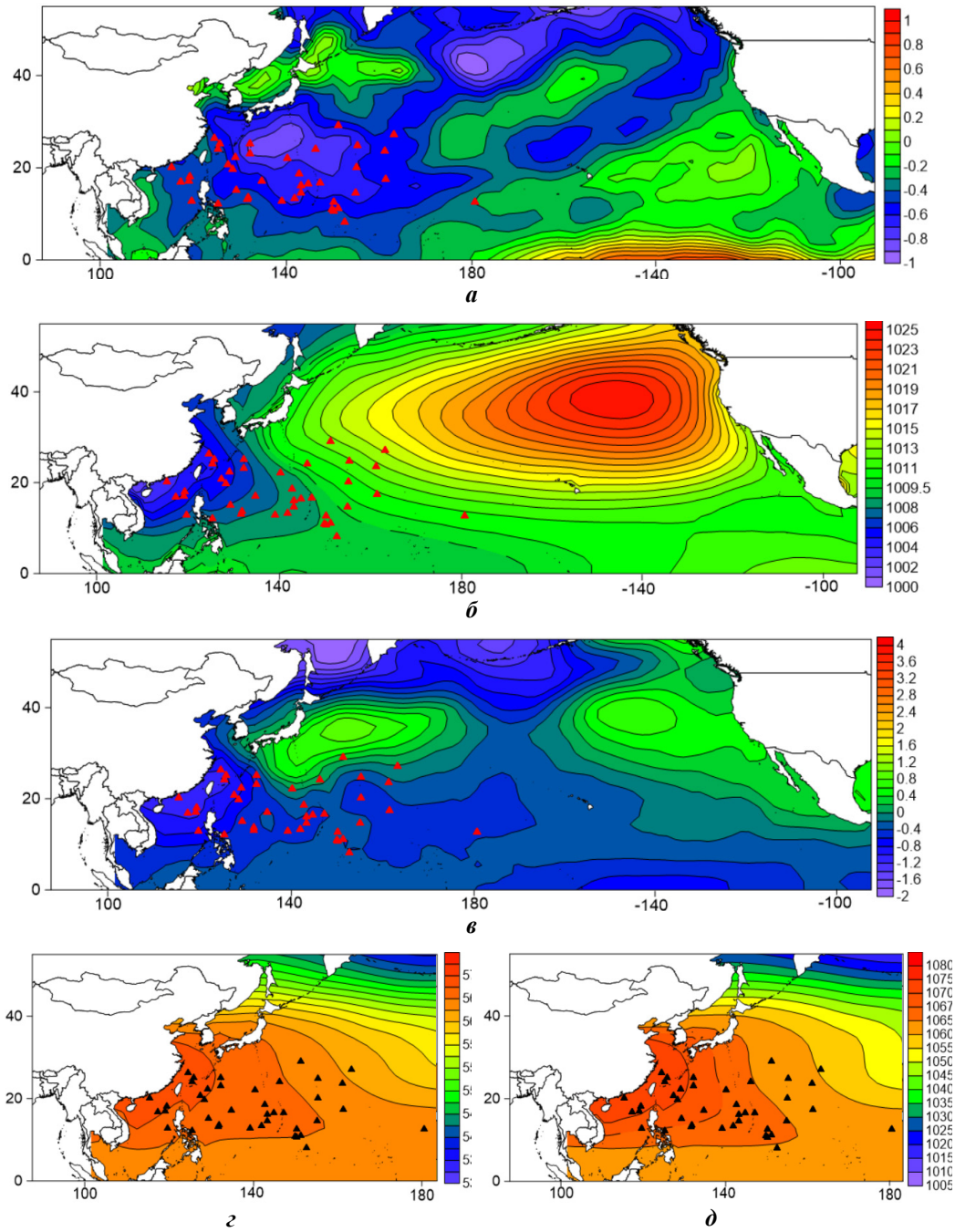


Рис. 6. Второй тип с аномально низкими ТПО: *а* – аномалии ТПО (°С); *б* – давление на уровне моря (гПа); *в* – аномалии давления на уровне моря (гПа); *г* – ОТ500/1000 (гп. дам.); *д* – ОТ250/1000 (гп. дам.). Треугольниками показаны районы зарождения тропических циклонов

Поскольку важность ТПО в районе формирования ТЦ определена, проанализируем многолетний ход среднегодовой температуры воды в рассматриваемом квадрате (рис. 7).

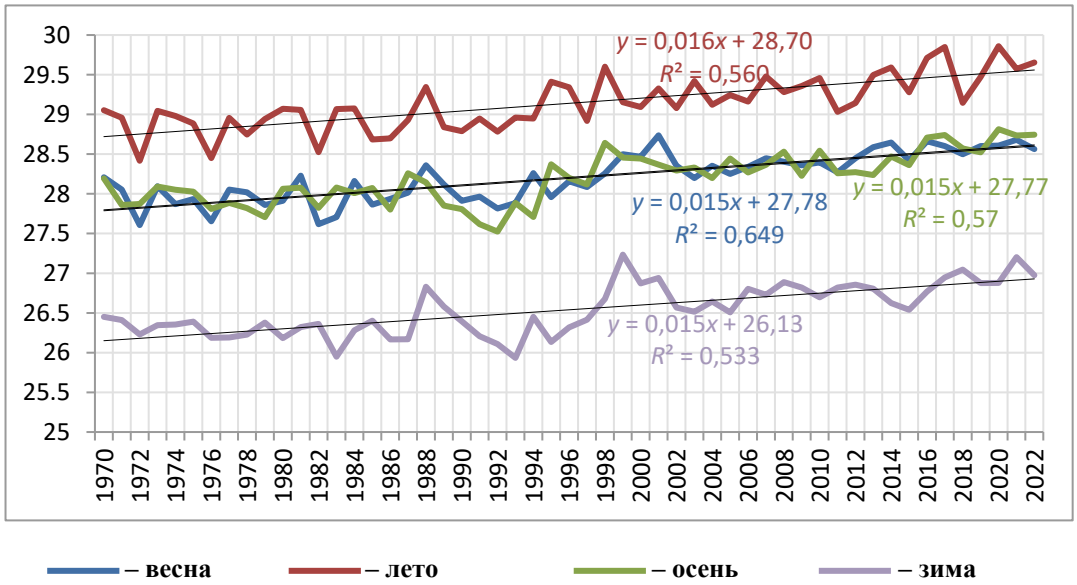


Рис. 7. Многолетний ход средне сезонных температур воды на поверхности в районе формирования тропических циклонов

Вся выборка разбита на сезоны. К зимним месяцам относятся январь – март, к весенним – апрель – июнь, к летним – июль – сентябрь, к осенним – октябрь – декабрь.

Для кривых на рис. 7 построены линейные тренды. Все они проверены на значимость по критерию Фишера и значимы на уровне 0,05. Увеличение температуры во все сезоны происходит с одинаковой тенденцией – 0,15–0,16°С /10 лет. Такое повышение температуры воды, возможно, связано с усилением Северо-Тихоокеанского антициклона в последние годы. В рамках данной работы такие исследования не проводились, но есть подтверждения других авторов [10], а как показано выше, поля ТПО и давления тесно связаны друг с другом, причем в целом поле давления, вероятно, играет решающую роль при формировании ТЦ, и при дальнейших исследованиях эти два параметра следует рассматривать в комплексе.

Если предположить, что тенденция ТПО будет сохраняться, то можно ожидать, что в летний период ТЦ будут формироваться значительно реже, а в остальные сезоны их количество и интенсивность может возрасти, но это требует дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Банк данных о тропических циклонах. Гидрометцентр России. [Электронный ресурс]. – URL: https://meteoinfo.ru/categ-articles/33-climate-cat/monitoring-klimata/tropcyclones/1164-1246618396 (дата обращения: 08.02.2023 г.).
2. Typhoonsearch. Japan Aerospace Exploration Agency Earth Observation Research Center (Исследовательский центр Японского агентства аэрокосмических исследований по наблюдению

Земли). [Электронный ресурс]. – URL: https://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/typ_db/typ_track.cgi?lang=e&area=WP (дата обращения: 08.02.2023 г.).
3. The NCAR Research Data Archive. [Электронный ресурс]. – URL: https://rda.ucar.edu/datasets/ds633.1/ (дата обращения: 10.02.2023 г.).
4. Риль Г. Климат и погода в тропиках. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 605 с.
5. Шулейкин В. В. Зависимость между мощностью тропического урагана и температурой подстилающей поверхности океана // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1970. – Т. 6. – № 42. – С. 1249–1237.
6. Тараканов Г. Г. Тропическая метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 128 с.
7. Хаин А. П., Сутырин Г. Г. Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 272 с.
8. Хаин А. П. Реакция осесимметричного тропического циклона на изменение температуры поверхности океана и испарение с поверхности // Метеорология и гидрология. – 1980. – № 10. – С. 59–63.
9. Смирнов Н. П., Воробьев В. Н. Северо-Тихоокеанское колебание и динамика климата в северной части Тихого океана. – СПб.: РГГМУ, 2002. – 121 с.
10. Шатилина Т. А., Цициашвили Г. Ш., Радченкова Т. В. Комплексная оценка изменчивости температуры воды на поверхности в северо-западной части Тихого океана в июле – сентябре 1950–2014гг. Известия ТИНРО. – 2016. С. 120–134.

INFLUENCE OF OCEAN SURFACE TEMPERATURE ON THE FORMATION OF TROPICAL CYCLONES IN THE NORTHWESTERN PACIFIC OCEAN

I. V. Lavrova (RSHU, «GNINGI» JSC), **O. N. Toptunova** (RSHU), **T. R. Shishkina** (RSHU, FBI «North-Western UGMS»), **E. G. Alekseeva, Yu. V. Efimova** (RSHU)

Ocean surface temperature (OST) is one of the main factors influencing the formation and development of tropical cyclones. It is known that tropical cyclones form at OST above 26°. In this paper, it is shown that at the time of the occurrence of cyclones, there is also an upper limit of the water temperature on the surface – 31 °. In such cases, another factor begins to work, higher pressure fields are noted, and the formation of cyclones does not occur. Over the past 50 years, in the northwestern Pacific Ocean in the area of the formation of tropical cyclones, there has been an increase in OST in all seasons by 0.15-0.16 °/10 years. If we assume that the trend will continue in the future, then we can expect that in the summer period tropical cyclones will form much less frequently, with less intensity and duration.

УДК 551.576.2:551.583

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О РАССЕЯНИИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ ВОЛНИСТООБРАЗНЫХ ОБЛАКОВ НИЖНЕГО ЯРУСА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А. П. ДОРОНИН, Н. А. КОЗЛОВА,
В. М. ПЕТРОЧЕНКО (ВКА имени А. Ф. Можайского)
Г. Г. ЩУКИН (АО «ГНИНГИ»)

В статье приводятся результаты исследований по разработке методического подхода к обоснованию принятия решения о рассеянии переохлажденных волнистообразных облаков нижнего яруса на основе данных наземных измерений.

Введение

Практика работ по модифицированию облаков показала, что при подготовке и планировании таких мероприятий в конкретных физико-географических районах (ФГР) особую актуальность приобретают данные о повторяемости их форм. Эти данные необходимы для выбора основных форм облаков как объектов модифицирования с той или иной целью в определенном ФГР. Исходя из этого, в качестве объекта модифицирования в настоящей работе рассматриваются волнистообразные облака нижнего яруса, а именно – слоистые (*St*) и слоисто-кучевые (*Sc*) облака. Выбор облаков указанных форм обусловлен следующими обстоятельствами.

Во-первых, эти облака являются наиболее часто встречающимися над различными ФГР России. Так, например, на их повторяемость в северном, северо-западном и центральном районах европейской территории России в холодное полугодие приходится 36,1, 49,6 и 45,7 %, а в теплое – 23,2, 26,6 и 22,7 % соответственно [1–3].

Во-вторых, с этими облаками связаны такие опасные явления погоды, как низкая облачность, плохая видимость, обледенение, осадки в виде дождя и снега и др., которые могут оказать существенное негативное влияние на деятельность различных хозяйственных отраслей.

В-третьих, облака этих форм имеют значительную горизонтальную протяженность (от нескольких сотен до нескольких тысяч километров), вследствие чего они имеют значительную продолжительность существования над пунктом (от нескольких часов до двух-трех суток).

В-четвертых, облака этих форм в течение года, как правило, имеют капельное или смешанное строение, что является важным фактором при их модифицировании, особенно, если облачные слои являются переохлажденными.

К настоящему времени установлено, что успех воздействия на волнистообразные облака может быть достигнут не всегда, а лишь при определенном сочетании их характеристик, получившем название критерия пригодности. Так, например, пригодными к рассеянию считаются переохлажденные волнистообразные облака с вертикальной протяженностью не более 1000 м, капельного или смешанного строения и со средней температурой облачного слоя не выше минус 3 °С [4]. Опыт

показывает, что для решения наибольшего числа прикладных задач необходимо проводить модифицирование переохлажденных волнистообразных облаков в течение года над различными ФГР России именно с целью их рассеяния.

Использование выше указанного критерия пригодности облаков к рассеянию неизбежно предполагает проведение самолетного зондирования с целью получения значений конкретных критериальных характеристик облачных слоев, что не всегда представляется возможным. Поэтому разработка косвенных методов оценивания пригодности переохлажденных волнистообразных облаков к рассеянию является актуальной и своевременной. На основании этого целью настоящей статьи является разработка методического подхода к обоснованию принятия решения о рассеянии переохлажденных волнистообразных облаков нижнего яруса на основе данных наземных измерений.

Описание методического подхода

Задача оценивания пригодности облачности к модифицированию является в настоящее время достаточной сложной. Это связано с тем, что непосредственное оценивание пригодности волнистообразных облаков для рассеяния затруднено, а методы краткосрочного прогнозирования до настоящего времени не разработаны. В связи с этим, в ходе исследований была оценена возможность разработки косвенного метода оценивания пригодности волнистообразных облаков для рассеяния.

При разработке метода мы исходили из того, что исходные данные для него должны удовлетворять следующим требованиям.

Во-первых, они должны быть в наибольшей степени связаны с температурными и геометрическими характеристиками волнистообразных облаков.

Во-вторых, они должны быть доступны для измерения и прогнозирования в любом метеорологическом подразделении.

Рассмотрим задачу оценивания пригодности волнистообразных облаков для рассеяния с учетом вышеуказанного критерия.

Пусть известны трехмерный вектор $\Pi_{\langle 3 \rangle}$ признаков пригодности волнистообразных облаков для рассеяния и пространство его возможных значений $\Omega = \left\{ \Pi^{\text{В}}_{\langle 3 \rangle} \right\}$. Применение критерия пригодности волнистообразных облаков для рассеяния позволяет разделить Ω на области Ω1 и Ω2, определяемые различным состоянием облачности:

облака пригодны для рассеяния, если

$$\Pi_{\langle 3 \rangle} \in \Omega_1, \tag{1}$$

и непригодны для рассеяния, если

$$\Pi_{\langle 3 \rangle} \in \Omega_2. \tag{2}$$

В случае, если значения признаков пригодности $\Pi_{\langle 3 \rangle}$ известны, задача оценивания пригодности волнистообразных облаков к рассеянию решается простой

проверкой выполнения условий (1) и (2). В противном случае мы можем говорить только о вероятности события (3):

$$P_{\Pi} = P\left(\Pi_{\langle 3 \rangle} \in \Omega_1\right). \tag{3}$$

В дальнейших рассуждениях будем исходить из предположения о том, что существует связь между некоторыми метеорологическими величинами – предикторами $X_{\langle k \rangle}$ и пригодностью волнистообразных облаков к рассеянию, то есть

$$P_{\Pi} = f\left(X_{\langle k \rangle}\right). \tag{4}$$

Для проверки этого предположения и последующей разработки метода на первом этапе был произведен предварительный отбор метеорологических величин, удовлетворяющих изложенным выше требованиям. В результате этого отбора был определен следующий перечень предполагаемых предикторов:

а) данные наземных наблюдений:

– температура воздуха у поверхности земли t_3^0;
– высота нижней границы облаков $H_{\text{Н}}$;
– влажность воздуха у поверхности земли;

б) данные спутниковых наблюдений:

– температура на верхней границе облаков $t_{\text{В}}^0$;
– высота верхней границы облаков $H_{\text{В}}$.

На втором этапе из числа предполагаемых предикторов выбирались различные пары метеорологических величин:

$$\left\{x_i, x_j\right\};\ i, j = 1(1)5,\ i \neq j. \tag{5}$$

Каждая такая пара исследовалась на материалах самолетного зондирования атмосферы, при этом рассматривались различные пункты (например, Архангельск, Санкт-Петербург), полугодия (теплое и холодное) и различное время суток (день и ночь).

Область возможных значений каждого из проверяемых предикторов x_i, x_j была разбита на интервалы. Затем из исследуемой выборки отбирались случаи, попадающие в каждое из сочетаний этих интервалов, и для них рассчитывалась повторяемость пригодных для рассеяния волнистообразных облаков. Полученные значения повторяемостей были размещены в узлах сетки, что позволило провести изолинии повторяемостей пригодных для рассеяния волнистообразных облаков. Оценка исследуемой пары предикторов определялась по расположению этих изолиний, исходя из следующих соображений.

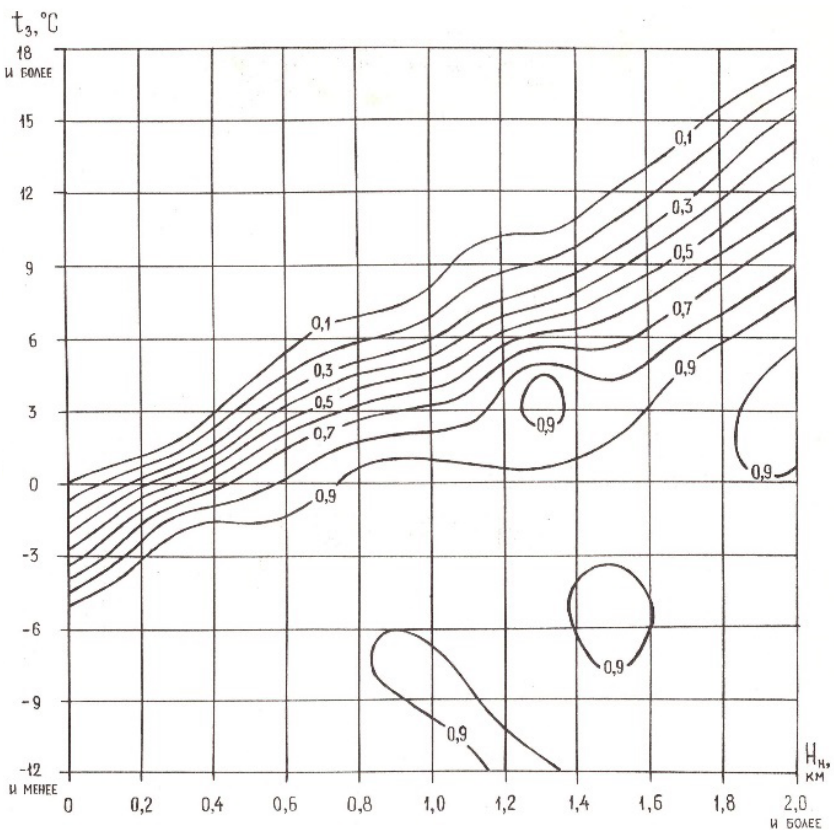
1. Если для данной пары $\left\{x_i, x_j\right\}$ не наблюдалось отчетливо выраженной закономерности в расположении изолиний, делался вывод о том, что эта пара метеорологических величин не может использоваться для оценки вероятности P_{Π};

2. Если изолинии располагались параллельно (или приблизительно параллельно) одной из осей координат, допустим, оси, на которой отложены значения x_i, делался вывод о том, что метеорологическая величина x_j может быть использована в качестве предиктора, а x_i для этой цели непригодна.

Таким образом, была определена наилучшая пара предикторов, которыми оказались температура воздуха у земли и высота нижней границы облаков. Связь остальных величин, подвергавшихся проверке, с пригодностью волнистообразных облаков для рассеяния оказалась слабой.

Кроме того, выяснилось, что изолинии, построенные для различных пунктов, холодного и теплого полугодий и различного времени суток, расположены в поле величин $t_{\text{з}}^0$ и $H_{\text{н}}$ практически одинаково. Это позволило сделать вывод о том, что связь между этими величинами и пригодностью волнистообразных облаков для рассеяния имеет в своей основе физические причины, и она не зависит ни от особенностей климатического режима местности, ни от времени года и суток.

В связи с этим данные самолетного зондирования атмосферы были объединены в один массив, в результате обработки которого была построена номограмма $\widetilde{P}_{\text{П}}\left\{t_{\text{з}}^0, H_{\text{н}}\right\}$, приведенная на рисунке.



Номограмма зависимости температуры воздуха у поверхности земли от высоты нижней границы облаков

Изолинии построены по значениям повторяемостей пригодных для рассеяния волнистообразных облаков, которые рассчитывались для каждого узла сетки (сочетания интервалов предикторов) по формуле:

$$P_{\Pi}^{*ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}};\ i, j = 1(1)10, \tag{6}$$

где n_{ij} – число случаев, попавших в i, j-е сочетание интервалов;

n_{ij} – число случаев, пригодных для рассеяния волнистообразных облаков из числа.

Правомерность объединения данных самолетного зондирования атмосферы в один массив независимо от пункта, времени года и суток, была подтверждена следующим образом.

Для каждого узла сетки рассчитывались по формуле (6) значения повторяемостей P_{Π}^{*ij} для общего массива данных самолетного зондирования атмосферы и $P_{\Pi}^{*ij'}$ для каждого из проверяемых исходных массивов. Выяснилось, что практически все полученные оценки удовлетворили условию:

$$P_{\Pi}^{*ij} - \tilde{\sigma}^{ij} \le P_{\Pi}^{*ij'} \le P_{\Pi}^{*ij} + \tilde{\sigma}^{ij}, \tag{7}$$

где

$$\tilde{\sigma}^{ij} = \sqrt{\frac{P_{\Pi}^{*ij}\left(1 - P_{\Pi}^{*ij}\right)}{n_{ij}}}. \tag{8}$$

Таким образом, номограмма (см. рисунок) может быть предложена для получения оценок вероятности P_{Π} на всей территории Северо-Западного региона России.

Применение разработанного метода оценивания пригодности волнистообразных облаков для рассеяния в целях информационного метеорологического обеспечения принятия решения на операцию будет рассмотрено ниже.

К настоящему времени выполнен целый ряд работ, посвященных вопросам оптимального использования метеорологической информации при принятии решения потребителем. К ним относятся, например, работы [5, 6], в которых показано, что оптимальным следует считать решение, при котором достигается минимум математического ожидания потерь, связанных с реализацией программ потребителя $E[\hat{c}]$.

Рассмотрим этот подход применительно к задаче рассеяния переохлажденных волнистообразных облаков. Пусть потребителю известно, что наблюдается пасмурное состояние неба, обусловленное волнистообразными облаками. В этом случае он располагает выбором из двух решений:

R – проводить операцию по рассеянию волнистообразных облаков;

$\overline{R}$ – отказаться от проведения рассеяния облаков.

Благоприятными метеорологическими условиями M для рассеяния волнистообразных облаков являются условия, когда они пригодны для рассеяния, а неблагоприятными $\overline{M}$ – когда они непригодны.

Введем обозначение потерь C_{ij} при различных сочетаниях принятых решений и осуществившихся метеорологических условиях (табл. 1).

Таблица 1. Потери при различных сочетаниях принятых решений и осуществившихся метеорологических условиях

Решения	Волнистообразные облака	
	M	$\overline{M}$
R	C_{11}	C_{12}
$\overline{R}$	C_{21}	C_{22}

Тогда оптимальным является решение R, если [5]

$$P(M) > P^{\text{пор}}, \tag{9}$$

где $P^{\text{пор}}$ определяется как функция элементов матрицы потерь согласно формуле:

$$\frac{C_{12} - C_{22}}{C_{21} - C_{11}} = \frac{P^{\text{пор}}}{1 - P^{\text{пор}}}. \tag{10}$$

Решение $\overline{R}$ оптимально при

$$P(M) < P^{\text{пор}}. \tag{11}$$

Тогда математическое ожидание средних нормированных потерь определяется по формуле:

$$E[\hat{\eta}] = \frac{P^{\text{пор}}}{1 - P^{\text{пор}}} P\left(\hat{R}, \hat{\overline{M}}\right) + P\left(\hat{\overline{R}}, \hat{M}\right), \tag{12}$$

где $P\left(\hat{R}, \hat{\overline{M}}\right)$ и $P\left(\hat{\overline{R}}, \hat{M}\right)$ – вероятности ошибочного принятия решений.

При использовании категорически-вероятностных прогнозов [5] должна применяться стратегия полного доверия к ним. Т. е. решение R принимается при прогнозе благоприятных условий „M", а решение $\overline{R}$ – при прогнозе неблагоприятных условий „$\overline{M}$". Тогда из выражения (12) получим:

$$E[\hat{\eta}] = \frac{P^{\text{пор}}}{1 - P^{\text{пор}}} P\left(„\hat{M}", \hat{\overline{M}}\right) + P\left(„\hat{\overline{M}}", \hat{M}\right), \tag{13}$$

где $P\left(„\hat{M}", \hat{\overline{M}}\right)$ и $P\left(„\hat{\overline{M}}", \hat{M}\right)$– вероятности составления ошибочного прогноза.

Оптимальным считается прогностический метод, при использовании которого потери минимальны, то есть достигается минимум величины $E[\hat{\eta}]$.

Рассмотрим задачу принятия решения органов управления на проведение работ по рассеянию волнистообразных облаков.

В этом случае для оценивания вероятности $P\left(\hat{M}\right)$ того, что волнистообразные облака пригодны для рассеяния, предлагается использовать метод, изложенный выше.

При этом

$$\widetilde{P}\left(\hat{M}\right) = \widetilde{P}_{\text{П}} = \widetilde{P}_{\text{П}}\left(t_{\text{З}}^{0}, H_{\text{Н}}\right). \tag{14}$$

Решение R принимается, если

$$\widetilde{P}_{\text{П}} > P_{\text{П}}^{\text{пор}}, \tag{15}$$

в противном случае принимается решение $\overline{R}$.

При окончательном принятии решения по рассеянию волнистообразных облаков (непосредственно перед ее проведением) значение $\widetilde{P}_{\text{П}}$ определяется по фактическим значениям $t_{\text{З}}^{0}$ и $H_{\text{Н}}$, при этом предполагаем, что оценивание облачной обстановки позволило определить ее как неблагоприятную, обусловленную волнистообразными облаками. При принятии решения на подготовку мероприятий к проведению рассеяния облаков предлагается использовать стандартные краткосрочные прогнозы погоды. При этом принятие решения осуществляется в два этапа. На первом этапе определяется, на какой тип облачной обстановки должен ориентироваться потребитель. Если ожидается малооблачное состояние неба, принимается решение не проводить рассеяние облаков.

Если ожидается, что неблагоприятная облачная обстановка будет обусловлена волнистообразными облаками, по номограмме (см. рисунок) оценивается вероятность $P_{\text{П}}$ с использованием прогностических значений исходных параметров. Далее на основании полученного значения $\widetilde{P}_{\text{П}}$ в соответствии с формулой (13) принимается решение на подготовку операций по рассеянию волнистообразных облаков.

Следует, однако, учитывать, что указание в тексте прогноза на тот или иной тип ожидаемой облачной обстановки еще не означает, что она будет наблюдаться фактически. В связи с этим в ходе исследований был выполнен анализ формулировок прогнозов погоды и фактически наблюдавшихся условий в районе аэродрома Пушкин (Санкт-Петербург) по материалам дневников погоды АВ-6 за пятилетний период. В результате выполненных исследований установлено, что наиболее важным фактором, определяющим оправдываемость прогнозов типа облачной обстановки, является синоптическое положение. При этом установлено, что если в холодное полугодие

прогнозируется синоптическое положение, связанное с однородными воздушными массами (отсутствие фронтальных разделов и циклонической деятельности), то прогнозам малооблачного состояния неба и наличия волнистообразных облаков не менее 5 баллов вполне можно доверять. Также с большой вероятностью при этих условиях следует ожидать наличия волнистообразных облаков, если в прогнозе указывается облачность других форм количеством не менее 5 баллов.

В табл. 2 представлены значения повторяемостей (в %) различных типов облачной обстановки при различных формулировках прогнозов за холодное полугодие при синоптических положениях, связанных с однородными воздушными массами.

Составление таблиц типа табл. 2 в метеоподразделениях может послужить основой для обеспечения органов управления дополнительной информацией для принятия решения по формулировкам краткосрочных прогнозов погоды. Однако следует учитывать, что полученные таким способом оценки повторяемостей находятся в большой зависимости от таких субъективных факторов, как индивидуальные особенности прогнозистов и методы, которыми они пользуются при составлении прогнозов.

Таблица 2. Повторяемость (в %) различных типов облачной обстановки при различных формулировках прогнозов за холодное полугодие при синоптических положениях

Формулировки прогнозов	Наблюдается		
	Ясно, малооблачно, облачность верхнего яруса	Облачность не менее 5 баллов	
		ТолькоSt-Sc облака	Облачность других форм
Ясно. Малооблачно. Облачность менее 5 баллов. Облачность верхнего яруса	79,4 / 88,4	20,5 / 93,3	0,1 / 2,3
Облачность среднего яруса не более 5 баллов	45,4 / 38,4	27,3 / 0,1	27,3 / 61,5
St-Sc не менее 5 баллов	23,9 / 8,7	70,3 / 89,7	5,8 / 1,6
Облачность не менее 5 баллов: – слоистых форм; – кучевых форм; – нижнего яруса (без указания формы)	6,5 / 3,6	83,7 / 94,0	9,8 / 2,3

Примечание: В числителе указаны значения повторяемостей за дневные сроки, а в знаменателе – за ночные.

Поскольку при составлении категорически-вероятностного прогноза пригодности волнистообразных облаков для рассеяния предполагается использовать метод, предложенный выше, необходимо оценить, насколько данный метод подходит для этой цели. Для проверки выполнен численный эксперимент, в ходе которого было смоделировано принятие решений на операцию с использованием оценок пригодности, определенных по фактическим и прогностическим значениям параметров t_3^0 и $H_{\text{Н}}$. В обоих случаях вычислялись математические ожидания средних нормированных потерь по формуле (13) при различных значениях пороговых

вероятностей. Полученные значения сравнивались с оценками $E[\hat{\eta}]$, рассчитанными для идеальных и климатических прогнозов. Показателем повышения качества информационного метеорологического обеспечения потребителя является коэффициент относительных предотвращенных потерь α_1 при реализации программ потребителя:

$$\alpha_1 = \frac{E[\hat{C}_{\text{К}}] - E[\hat{C}]}{E[\hat{C}_{\text{К}}] - E[\hat{C}_{\text{И}}]}, \tag{16}$$

где $\hat{C}_{\text{К}}$ – потери при использовании климатического прогноза пригодности;

$\hat{C}$ – потери при использовании оцениваемого прогностического метода;

$\hat{C}_{\text{И}}$ – потери при использовании идеального прогноза пригодности.

Обозначим потери при использовании фактических значений параметров t_3^0 и $H_{\text{Н}}$ для оценивания пригодности волнистообразных облаков для рассеяния как $C_{\text{Ф}}$, а потери при использовании прогностических значений – как $C_{\text{П}}$. Тогда соответствующие коэффициенты относительных предотвращенных потерь обозначим как $\alpha_1^{\text{Ф}}$ и $\alpha_1^{\text{П}}$.

В качестве исходного материала для численного эксперимента были использованы следующие данные по району Санкт-Петербурга:

– прогностические значения t_3^0 и $H_{\text{Н}}$ исходных параметров из формулировок краткосрочных прогнозов погоды;

– соответствующие срокам прогнозов данные самолетного зондирования атмосферы, представляющие собой независимый материал.

Всего было отобрано 326 формулировок прогнозов, составленных на сроки, за которые имелись данные самолетного зондирования атмосферы.

Во всех случаях благоприятными условиями M считались условия, когда волнистообразные облака являлись пригодными для рассеяния по данным самолетного зондирования атмосферы.

По данным благоприятных условий „M" моделировался прогноз следующим образом:

1. Идеальный прогноз пригодности волнистообразных облаков для рассеяния – во всех случаях прогноз „M" соответствует фактически наблюдавшимся условиям M.

2. Применение предлагаемого метода оценивания пригодности с использованием фактических значений исходных параметров (что соответствует их идеальному прогнозу) – решение принималось в соответствии с выражением (15), где $\widetilde{P}_{\text{П}}$ определялась по номограмме в соответствии с фактическими значениями t_3^0 и $H_{\text{Н}}$ (по данным самолетного зондирования атмосферы).

3. Применение предлагаемого метода с использованием прогностических значений исходных параметров – $\widetilde{P}_{\text{П}}$ для принятия решения определялась по

прогностическим значениям t_3^0 и $H_{\text{Н}}$ (в соответствии с реальными прогнозами погоды).

4. Климатический прогноз пригодности – для принятия решения использовались климатические ежемесячные значения $P_{\text{п}}^*$, полученные в настоящей работе.

Соответствующие значения величин $E\left[\hat{C}_{\text{Ф}}\right]$, $E\left[\hat{C}_{\text{П}}\right]$, $E\left[\hat{C}_{\text{К}}\right]$, $\alpha_1^{\text{Ф}}$, $\alpha_1^{\text{П}}$ при различных значениях пороговой вероятности представлены в табл. 3 (очевидно, что $E\left[\hat{C}_{\text{И}}\right] = 0$.

Таблица 3. Значения величин $E\left[\hat{C}_{\text{Ф}}\right]$, $E\left[\hat{C}_{\text{П}}\right]$, $E\left[\hat{C}_{\text{К}}\right]$, $\alpha_1^{\text{Ф}}$, $\alpha_1^{\text{П}}$ при различных значениях пороговой вероятности

$P_{\text{П}}^{\text{пор}}$	$E\left[\hat{C}_{\text{Ф}}\right]$	$E\left[\hat{C}_{\text{Ф}}\right]$	$E\left[\hat{C}_{\text{К}}\right]$	$\alpha_1^{\text{Ф}}$	$\alpha_1^{\text{П}}$
0,1	0,013	0,021	0,032	0,59	0,34
0,3	0,024	0,036	0,083	0,71	0,57
0,5	0,40	0,103	0,181	0,78	0,43
0,7	0,108	0,196	0,363	0,70	0,46
0,9	0,189	0,319	0,595	0,68	0,46

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что оценивание пригодности волнистообразных облаков для рассеяния по номограмме (см. рисунок) позволяет существенно снизить ожидаемые потери потребителя по сравнению с потерями при использовании климатических прогнозов. Так, при значении пороговой вероятности $P_{\text{П}}^{\text{пор}} = 0{,}5$ средние предотвращенные потери за счет использования предлагаемого метода составляют по отношению к потерям при использовании климатических прогнозов 0,78 для оценок, полученных по фактическим значениям (или идеальным прогнозам) исходных параметров, и 0,43 для оценок, полученных по их реальным краткосрочным прогнозам. При этом, однако, существуют возможности для совершенствования как самого метода, так и методов прогнозирования исходных параметров.

Выводы

1. Проведено обоснование выбора волнистообразных облаков нижнего яруса (St, Sc) в качестве объекта модифицирования с целью их рассеяния. Показано, что облака этих форм являются наиболее часто встречающимися в различных ФГР России, имеют капельное или смешанное строение, значительную горизонтальную протяженность (сотни – тысячи километров) и большую длительность существования над пунктом (часы – двое-трое суток). Кроме того, с ними связаны такие опасные явления погоды, как: низкая облачность, плохая видимость, обледенение, осадки в виде дождя и снега и др., которые могут оказать существенное негативное влияние на деятельность различных хозяйственных отраслей.

2. Разработан и проверен на независимом материале категорически-вероятностный метод оценивания и прогнозирования пригодности переохлажденных

волнистообразных облаков нижнего яруса для рассеяния по данным наземных измерений.

3. Данный метод может быть использован при разработке методики информационного метеорологического обеспечения мероприятий по рассеянию переохлажденных волнистообразных облаков нижнего яруса, а его применение даст возможность системе информационного метеорологического обеспечения предоставлять органам управления обоснованные рекомендации по принятию решений по их рассеянию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доронин А. П., Щукин Г. Г., Дидык О. И., Петроченко В. М., Шмалько С. А. Возможность рассеяния волнистообразной и слоистообразной облачности в северных районах Европейской территории России в интересах гидрометеорологического обеспечения // Навигация и гидрография. – 2016. – № 45. – С. 60–69.
2. Доронин А. П., Петроченко В. М., Гончаров И. В., Дидык О. И., Козлова Н. А. Оценки пригодности к рассеянию волнистообразных и слоистообразных облаков в северо-западном районе Европейской территории России в интересах гидрометеорологического обеспечения // Навигация и гидрография. – 2020. – № 59. – С. 70–80.
3. Доронин А. П., Петроченко В. М., Козлова Н. А., Гончаров И. В. Характеристики волнистообразных и слоистообразных облаков над центральным районом Европейской территории России применительно к проблеме рассеяния в задачах гидрометеорологического обеспечения // Навигация и гидрография. – 2022. – № 66. – С. 75–89.
4. Половина И. П. Рассеяние переохлажденных слоистообразных облаков и туманов. – Л.: ГМИ, 1980. – 213с.
5. Жуковский Е. Е. Метеорологическая информация и экономические решения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 304 с.
6. Волконский Ю.Н. Синоптическая метеорология и специальные прогнозы погоды. Учебник. Воен. инженер. акад. им. А. Ф. Можайского. – Л.: ВИКА им. А. Ф. Можайского, 1973. – 516 с.

METHODOLOGICAL APPROACH TO SUBSTANTIATING THE DECISION ON THE SCATTERING OF SUPERCOOLED LAYERED CLOUDS OF THE LOWER TIER BASED ON GROUND-BASED MEASUREMENTS

A. P. Doronin, N. A. Kozlova, V. M. Petrochenko (A. F. Mozhaisky Military Space Academy), **G. G. Shchukin** («GNINGI» JSC)

The article presents the results of research on the development of a methodological approach to substantiating the decision on the scattering of supercooled undulating clouds of the lower tier based on ground-based measurements.

УДК 551.582;504.38

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА АРКТИЧЕСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И ЕЕ СВЯЗЬ С ИЗМЕНЕНИЯМИ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ

О. Н. ТОПТУНОВА, И. А. ИВАНОВА, О. Г. АНИСКИНА,
М. А. МОЦАКОВ (ФГБОУ ВО «РГГМУ»),
И. В. ЛАВРОВА (ФГБОУ ВО «РГГМУ», АО «ГНИНГИ»),
Т. Р. ШИШКИНА (ФГБОУ ВО «РГГМУ», ФГБУ «Северо-Западное УГМС»)

Рассматриваются изменения коэффициента линейного тренда приземной температуры воздуха по Арктической зоне Российской Федерации, и устанавливается его связь с составляющими общей циркуляции атмосферы за три десятилетия. Выявлено общее повышение температуры в исследуемом регионе и его связь с изменением циркуляции в зимний период.

Изменения климата, происходящие в полярных областях Земли, находят отклик в режиме метеорологических параметров многих регионов. В Арктических районах колебания температуры воздуха происходит достаточно стремительно в сравнении с другими регионами. Изменение климата в Арктике принято изучать отдельно от изменения климата в целом на Земле, поскольку, при современном процессе потепления именно в Арктике климат меняется наиболее интенсивно [1]. Это получило название «полярное усиление». И хотя сам факт потепления научное сообщество обсуждает уже давно, но относительно причин происходящих изменений до сих пор не принято консолидированного решения. Существует несколько точек зрения: естественные причины [2, 3], антропогенное воздействие [4, 5] и более сложные комплексные связи, то есть влияние антропогенных факторов на естественные климатообразующие, например, на циркуляцию [6–8].

Методика

Изменение климата в Арктике даёт России определенные перспективы экономического развития, например, в использовании Северного морского пути, а потому в данной работе исследовались климатические тенденции исключительно холодного времени года, то есть с октября по апрель. Анализировались наблюдения 19 метеостанций (рис. 1), данные которых были взяты из открытого источника – Мирового центра данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации [9].

Для исследования выбран тридцатилетний период – с 1991 по 2020 гг. Он достаточен, чтобы говорить о климате, и интересен тем, что позволяет проанализировать, как потепление, начавшееся после 1980-х годов, отразилось на климате Арктики, а также оценить современные тенденции изменения климата Арктических регионов России.

Для температуры каждого месяца на всех исследуемых станциях был рассчитан линейный тренд, для оценки значимости линейной модели была использована F-статистика Фишера на пятипроцентном уровне значимости.

Рис. 1. Расположение исследуемых метеостанций

По данным реанализа NCEP/NCAR [10] для территории Российской Арктики (45° с. ш. – 75° с. ш. и 0°в. д. – 180° в. д.) рассчитаны осредненные градиенты геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа. Эта поверхность выбрана из-за того, что ведущие потоки именно средней тропосферы во многом определяют траектории движения основных барических образований – циклонов и антициклонов. Так как исследовалось крупномасштабное влияние процессов, то для расчета циркуляции была взята не только область Арктики.

Расчеты проводились для каждого дня исследуемого периода по следующим формулам:

$$GR_{\lambda}(i,j) = \frac{H(i+1,j)-H(i-1,j)}{2d\lambda}, \quad (1)$$

$$\mathrm{GR}_{\varphi}(i,j) = \frac{\mathrm{H(i,j+1)-H(i,j-1)}}{2\mathrm{d}\varphi}, \quad (2)$$

где $GR_{\lambda}(i,j)$ – меридиональный индекс, $GR_{\varphi}(i,j)$ – зональный индекс,
H – значение геопотенциала на изобарическй поверхности 500 гПа,
$d\lambda$ – шаг сетки (в градусах) по долготе,
$d\varphi$ – шаг сетки (в градусах) по широте,
i и j – номер узла по долготе и широте, соответственно,
$d\lambda = d\varphi$ =2,5°.

Формулы (1) и (2) повторяют алгоритм расчета индекса А. Л. Каца [11], но расчеты проводятся более точным способом – способом конечных разностей.

В результате получены значения индексов в каждом узле сетки за каждый день тридцатилетнего периода. На его основе вычислялось среднее значение индексов за каждый месяц по трем периодам: 1991–2000 гг., 2001–2010 гг. и 2011–2020 гг. После этого рассчитывалось отношение зональной и меридиональной форм циркуляции по формуле (3).

$$I_{\text{общ.}} = \left| \frac{\mathrm{GR}_{\varphi}(i,j)}{\mathrm{GR}_{\lambda}(i,j)} \right|, \quad (3)$$

где $I_{\text{общ.}}$ – общий индекс циркуляции.

Важно отметить, что рассматривались именно ежедневные данные, так как при работе с осредненными за месяц значениями геопотенциала рассчитанные значения будут ошибочны, поскольку индексы циркуляции основаны на анализе изменений воздушных масс и потоков воздуха в течение определенного периода времени. Ежедневные данные геопотенциала позволяют учитывать эти динамические изменения. Кроме того, такой подход позволяет учесть вариабельность атмосферных процессов в течение месяца (появление, исчезновение и перемещение циклонов и антициклонов и пр.)

Анализ изменений температуры и циркуляции

При анализе изменений температуры воздуха рассматривались только значимые коэффициенты линейного тренда (все значимые коэффициенты линейного тренда оказались положительными). Эти коэффициенты отображены на рис. 2 розовым и красным цветом.

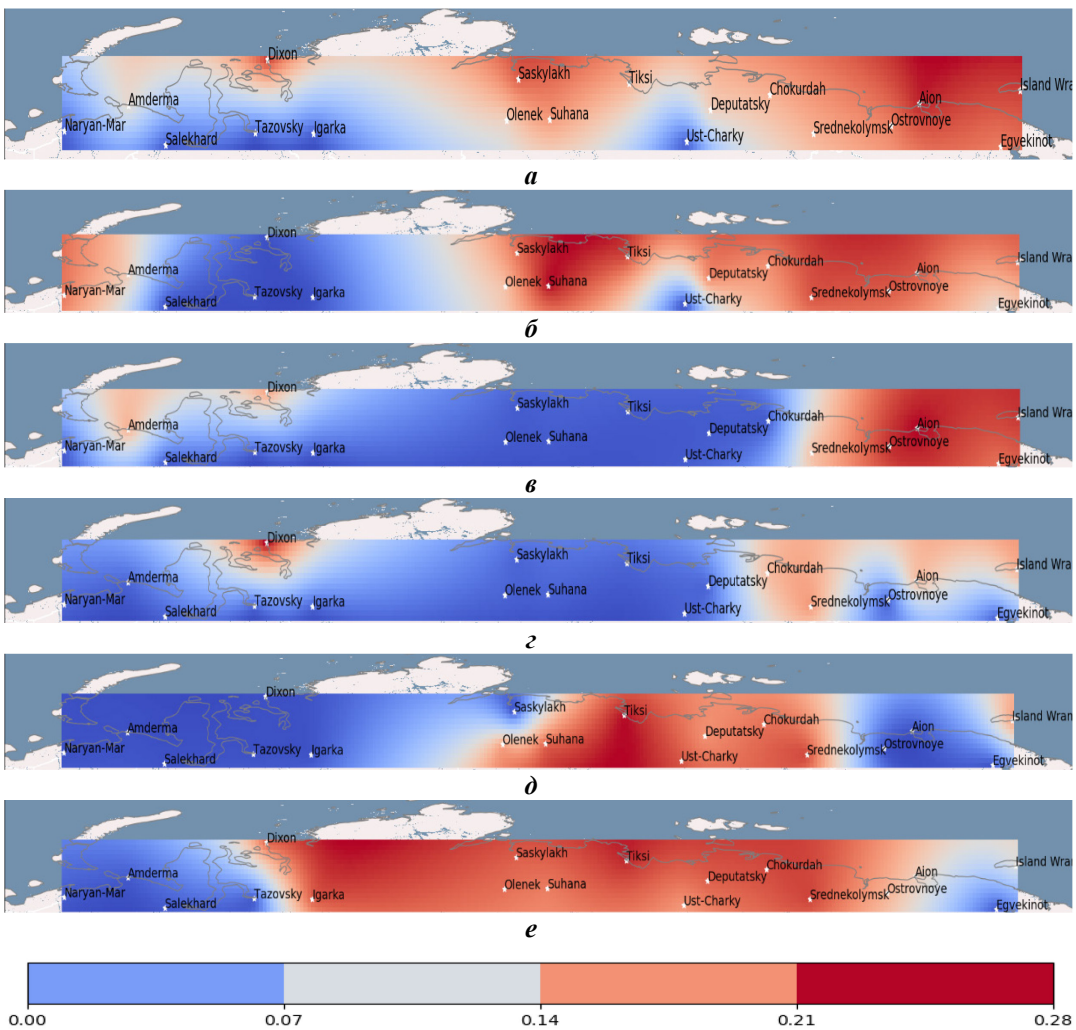


Рис. 2. Коэффициенты линейного тренда в октябре (*а*), ноябре (*б*), декабре (*в*), январе (*г*), марте (*д*) и апреле (*е*)

Из анализа полей, представленных на рис. 2, видно, что температура растет неравномерно по территории. Причем интересно, что в переходные месяцы рост температуры более значителен. В октябре, ноябре и апреле температура растет на большей части территории, тогда как в январе значимых коэффициентов мало, а в феврале таковых нет совсем. В октябре – ноябре температура сильнее всего растет на севере Восточной Сибири (коэффициенты линейного составляют от 0,13 до 0,23) и Дальнего Востока (коэффициенты линейного составляют от 0,15 до 0,23). Наиболее значительные изменения температуры наблюдаются в переходные периоды (октябрь, ноябрь и апрель) – интересный результат, который позволяет говорить о том, что общее повышение температуры воздуха происходит из-за повышения температуры именно в весенне-осенний сезон, зимой температура воздуха меняется не так значительно. Основной причиной такой динамики изменений, как мы полагаем, является влияние солнечной радиации. Как известно, в зимние месяцы на большей части исследуемой территории устанавливается полярная ночь, а в переходные месяцы вместе с увеличением длины дня в Арктике увеличивается солнечная активность. Кроме того, в переходные месяцы теплые океанские течения могут проникать в Арктику и нагревать поверхностные воды. Отдельно рассматривается вопрос с изменением циркуляции. В качестве примера выбран декабрь – месяц, для которого характерна полярная ночь. На рис. 2*в* видно, что сильнее всего в этот месяц теплеет на Дальнем Востоке и на побережье Карского моря. Именно поэтому анализ индексов циркуляции для него особенно интересен.

В полях меридионального и зонального индексов циркуляции, приведённых на рис. 3, полагаем что: при меридиональном переносе очаги синего цвета означают перенос с севера, оранжевого – с юга, при зональном переносе очаги синего цвета указывают на западный перенос, а очаги оранжевого – восточный. Стрелками обозначено направление переноса.

Можно предположить, что изменение атмосферной циркуляции есть первопричина происходящих изменений в температуре воздуха в зимние месяцы. Приведём пример интенсификации циркуляционных процессов в рассматриваемые периоды в декабре.

Как видно из анализа полей составляющих циркуляции, от периода к периоду увеличивается интенсивность и площадь очага с положительной (восточной) составляющей циркуляции на Дальнем Востоке (очаг жёлтого цвета на рис. 3 (слева)). В Арктическом регионе интенсивность зональной составляющей циркуляции (перенос с запада) снижается от первого периода ко второму и третьему на севере Западной Сибири (очаг синего цвета).

В декабре, как видно при анализе полей, представленных на рис. 3 справа, за последние десятилетия в регионе Дальнего Востока интенсифицировались потоки с юга. Незначительно усиливается и возрастает по площади область с южным переносом на Чукотке. Следует отметить, что в рассматриваемом районе Арктической зоны достаточно устойчиво наблюдаются южные потоки ив районе Карского моря.

Общий индекс циркуляции на всей Арктической территории больше 1, то есть наблюдается преобладание зональной составляющей. Наиболее высоки его значения в районе Баренцева и Карского морей.

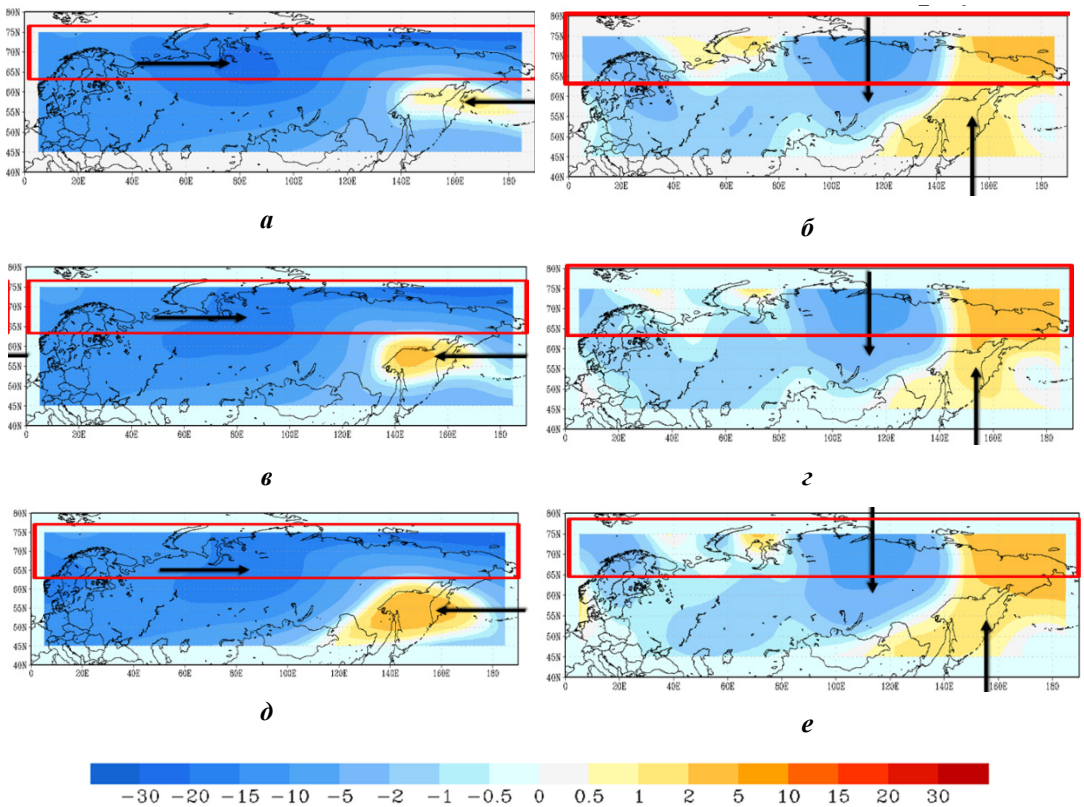


Рис. 3. Зональная (слева) и меридиональная (справа) составляющие циркуляции в декабре для различных периодов 1991–2000 гг. (*а, б*), 2001–2010 гг. (*в, г*), 2011–2020 гг. (*д, е*)

Можно предположить, что в декабре на изменения температурного фона в восточных районах Сибири и на Чукотке оказывают влияние изменения в атмосферной циркуляции, связанные с усилением активности Тихоокеанских циклонов, а в Карском море – с активизацией Атлантических циклонов, проникающих дальше вглубь континента.

Рассмотрим другой зимний месяц, когда на части территории растет температура воздуха. Так, в январе повышенные положительные значения коэффициента линейного тренда температуры наблюдаются в северо-восточном секторе Карского моря и на севере Восточной Сибири. Общий фон составляющих циркуляции аналогичен декабрьскому. По сравнению с декабрем, на Чукотке и на севере Восточной Сибири общий индекс циркуляции меньше 1 (преобладают меридиональные процессы). На рис. 4 представлены зональный (слева) и меридиональный (справа) индексы за январь по десятилетним периодам.

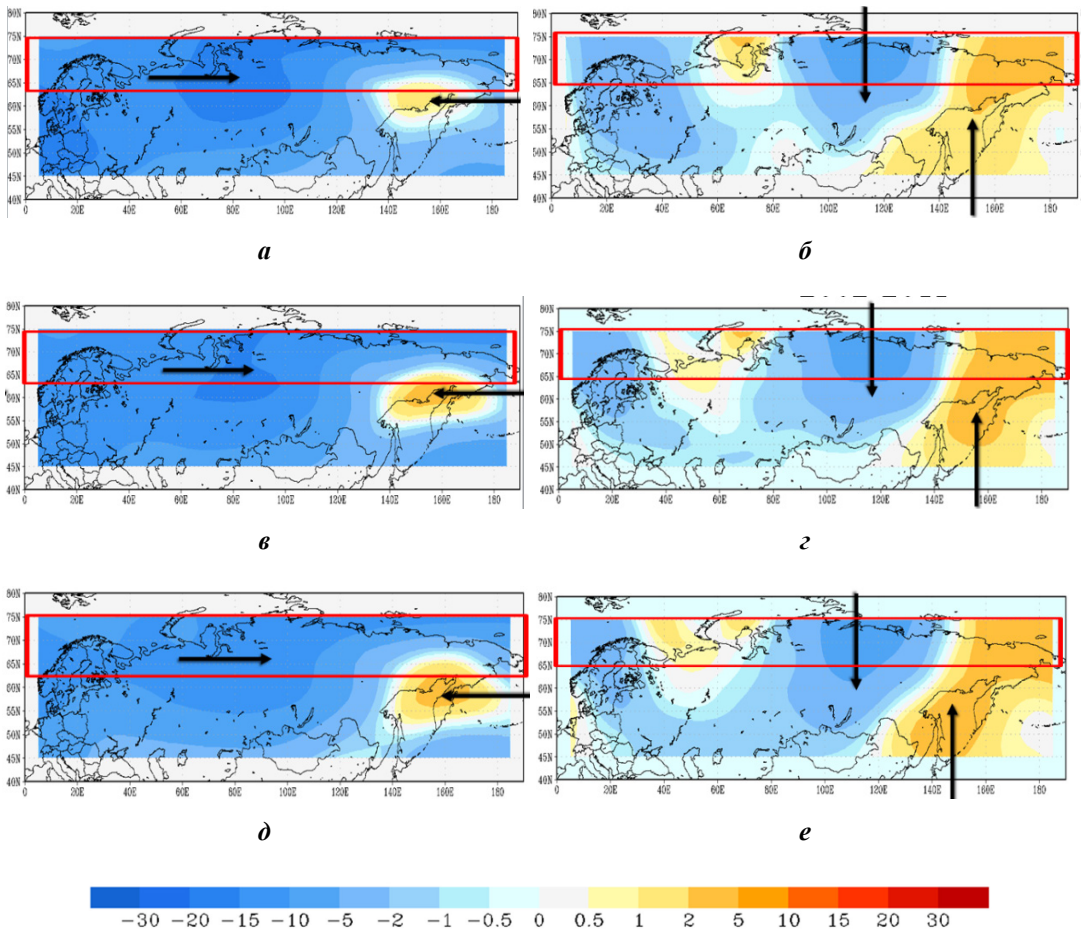


Рис. 4. Зональная (слева) и меридиональная (справа) составляющие циркуляции в январе 1991–2000 гг. (*а*, *б*), 2001–2010 гг. (*в*, *г*), 2011–2020 гг. (*д*, *е*)

В феврале значимые тенденции изменения отсутствуют, поэтому далее перейдем непосредственно к переходным месяцам, когда изменения по территории более значительны. Так, в марте хорошо выражена область с положительным коэффициентом линейного тренда температуры над Центральной Сибирью. При этом в меридиональной циркуляции над этим районом преобладает северный перенос, не меняющийся по интенсивности от периода к периоду (рис. 5, справа), в зональной составляющей – западный (рис. 5, слева). Коэффициент общей циркуляции на всей рассматриваемой территории незначительно выше единицы.

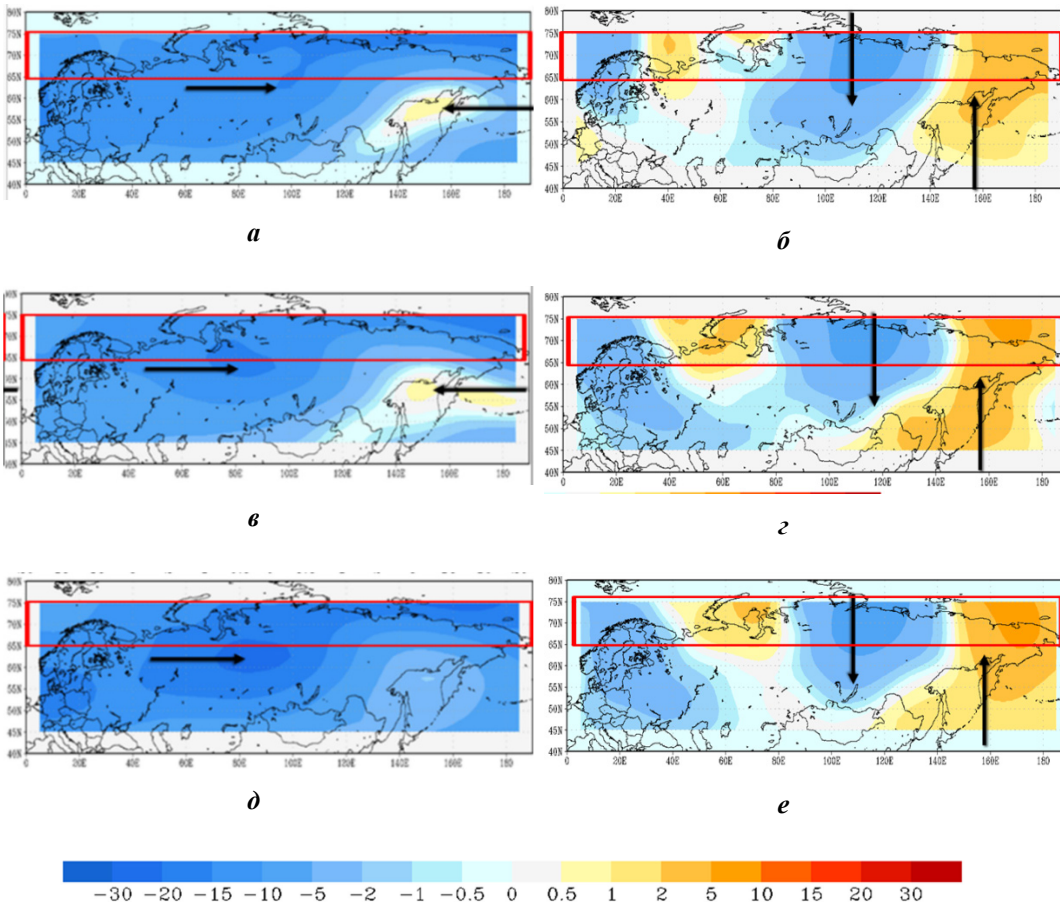


Рис. 5. Зональная (слева) и меридиональная (справа) составляющие циркуляции в марте 1991–2000 гг. (*а*, *б*), 2001–2010 гг. (*в*, *г*), 2011–2020 гг. (*д*, *е*)

В апреле область с положительным коэффициентом линейного тренда температуры увеличивается по площади и занимает почти всю территорию Арктической зоны, за исключением юго-западной части Карского моря (включая побережье) и Чукотки. При этом над ней так же, как и в марте, наблюдаются северная и западная составляющие переноса без изменения интенсивности. В общем индексе преобладает зональная составляющая, причём заметно усиливается в третьем периоде в Западной Сибири. Ниже, на рис. 6 представлены зональная и меридиональная составляющие переноса.

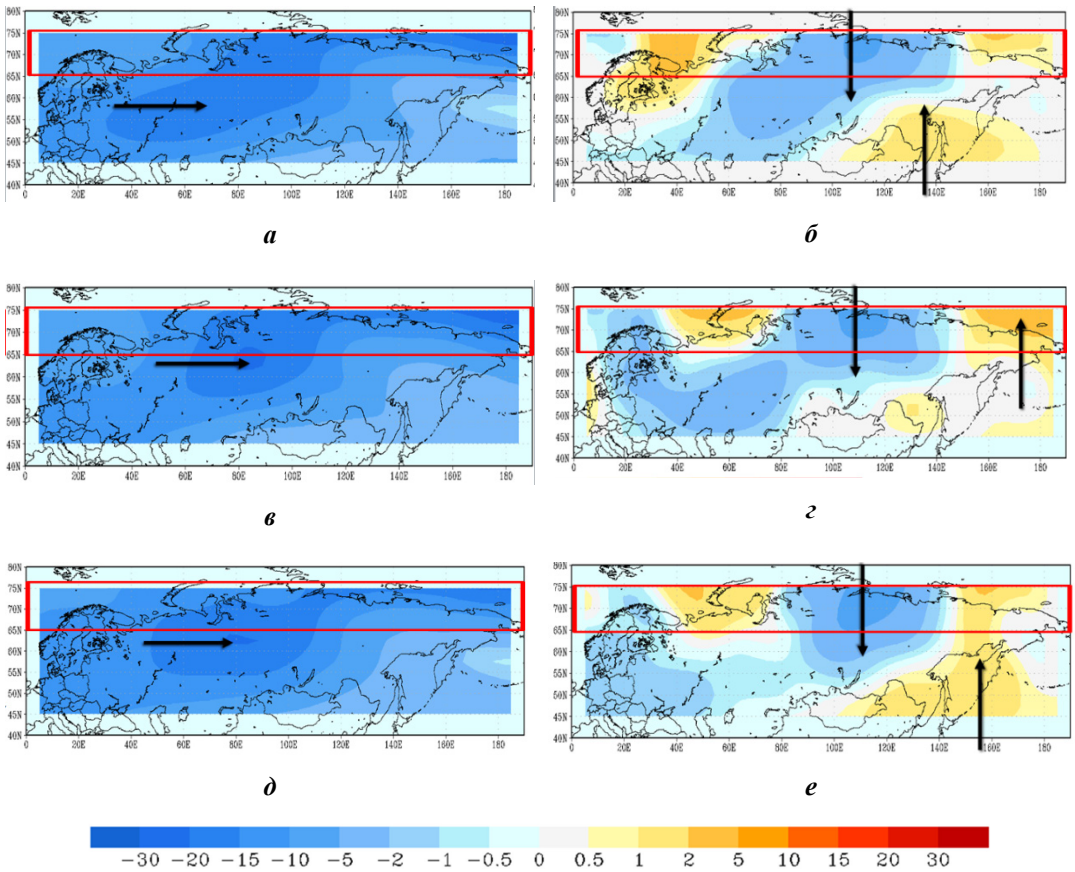


Рис. 6. Зональная (слева) и меридиональная (справа) составляющие циркуляции в апреле 1991–2000 гг. (*а, б*), 2001–2010 гг. (*в, г*), 2011–2020 гг. (*д, е*)

Таким образом, причина роста температуры весной достаточно сложная, и ее нельзя объяснить только изменением циркуляции.

В октябре положительные коэффициенты линейного тренда температуры наблюдаются почти во всей Арктической зоне. При этом в меридиональной циркуляции над ней отмечены как северные, так и южные составляющие. Над Арктической зоной Центральной Сибири северный перенос стал менее интенсивным в последнее десятилетие, и одновременно появилась область с южной составляющей переноса в Западной Сибири (рис. 7, справа). В зональной составляющей (рис. 7, слева) на всей территории – западный перенос с незначительным изменением интенсивности. В общем индексе – преобладание зональной составляющей переноса.

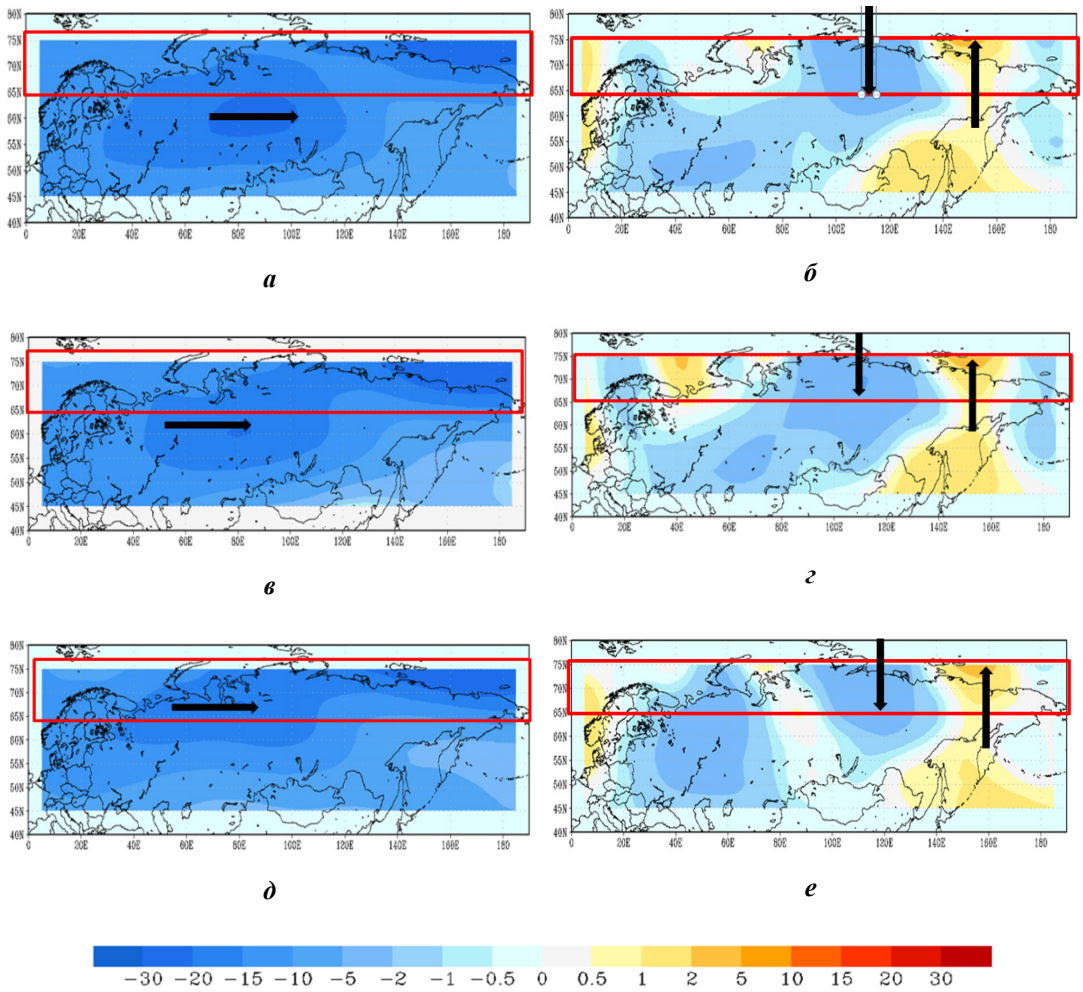


Рис. 7. Зональная (слева) и меридиональная (справа) составляющие циркуляции в октябре 1991–2000 гг. (*а*, *б*), 2001–2010 гг. (*в*, *г*), 2011–2020 гг. (*д*, *е*)

В температурном тренде ноября во многом сохраняются те же особенности, которые отмечены предыдущем месяце, за исключением района Карского моря. В меридиональной составляющей наблюдается перенос как в южном, так и в северном направлениях (рис. 8, справа). Причём над Карским морем южная составляющая в первых двух периодах сменилась на северную в третьем периоде. Северный перенос над Западной и Центральной Сибирью несколько снизился. В зональной составляющей – перенос с запада без изменения интенсивности в Арктической зоне (рис. 8, слева). В общем индексе циркуляции в рассматриваемом районе преобладает зональная составляющая со снижением интенсивности в третьем периоде в районе юго-западной части Карского моря.

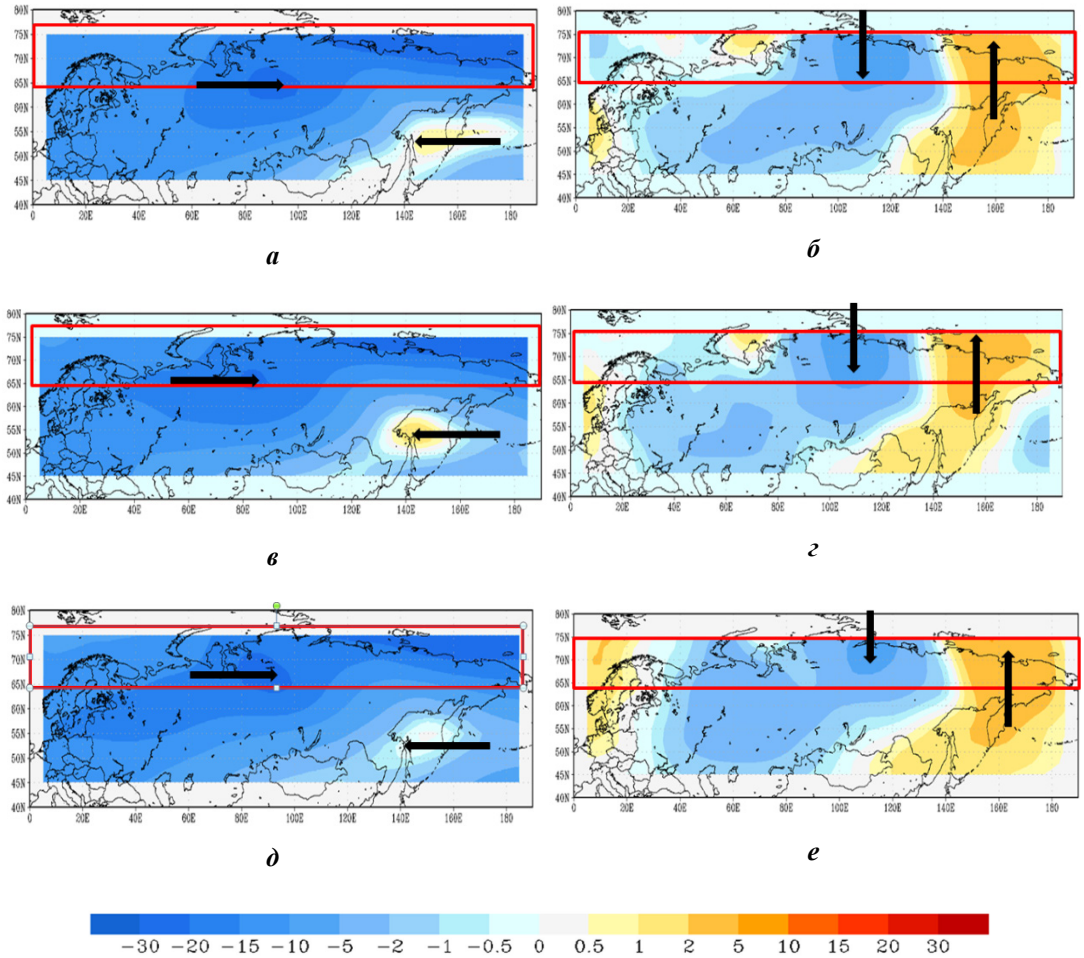


Рис. 8. Зональная (слева) и меридиональная (справа) составляющие циркуляции в ноябре 1991–2000 гг. (*а, б*), 2001–2010 гг.(*в, г*), 2011–2020 гг. (*д, е*)

Выводы

Тенденция к повышению температуры характерна для Арктической зоны Центральной и Восточной Сибири, Чукотки и Карского моря. Наиболее выражена она в переходные месяцы года. В зимние месяцы области с тенденцией к повышению температуры хорошо согласуются с преобладающими направлениями составляющих циркуляции. В переходные сезоны связь между повышением приземной температуры и изменениями характера циркуляции не так очевидна и, возможно, в эти периоды изменения следует рассматривать в комплексе с отклонениями от нормы количества морского льда и сроками его установления (разрушения), изменениями характеристик снежного покрова и другими причинами, в том числе, антропогенного происхождения.

Однако, как показано в работе, алгоритм Каца для анализа циркуляции в средней тропосфере позволяет более полно понять и объяснить причины изменений климата.

Изучение тенденций в изменении климата в Арктической зоне является важной задачей для понимания глобальных изменений и принятия соответствующих мер для адаптации и смягчения негативных последствий. Поэтому необходимы дальнейшие исследования и наблюдения в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moon T. A., Druckenmiller M. L., Thoman R. L. Executive Summary // NOAA Technical Report OAR ARC; 21-01. Arctic Report Card 2021.4 p. https://doi.org/10.25923/5s0f-5163. – URL: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/34308
2. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Смоляницкий В. М. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – № 2 (85). – С. 52.
3. Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Смоляницкий В. М. 60-летняя цикличность в изменениях климата полярных регионов // Материалы гляциологических исследований. – 2008. – Т. 105. – С. 158–165.
4. Gillett N. P., Stone D. A., StottP. A., Nozawa T., Karpechko A. Y., Hegerl G. C., Wehner M. F., Jones P. D. Attribution of polar warming to human influence // Nature Geoscience. – 2008. – V. 1. – № 11. – P. 750–754.
5. Symon C., Arris L., Heal B. (eds) Arctic Climate Impact Assessment. – Cambridge Univ. Press, 2005. – 1020 pp.
6. Song Se-Y., Yeh S.W., Kim H. et al. Arctic warming contributes to increase in Northeast Pacific marine heatwave days over the past decades // Commun Earth Environ. – 2023. – 4. – 25 pp. https://doi.org/10.1038/s43247-023-00683-y
7. Кошкина А. С., Топтунова О. Н., Анискина О. Г., Волобуева О. В., Дробжева Я. В. Циркуляционные изменения в режимах температуры, осадков и снежного покрова в северо-западной части Сибири как отклик глобального потепления// Динамика и взаимодействия геосфер Земли: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле. В 3-х томах. Том II. Томск, 8–12 ноября 2021. – Томск: Издательство: Томский центр научно-технической информации, 2021. – С. 149–151.
8. Лаврова И. В., Андреева А. А., Топтунова О. Н. Исследование взаимосвязи индекса Северо-Атлантического колебания и изменений температур на разных высотах // Навигация и гидрография. – 2022. – № 66. – С. 108–115.
9. Мировой центр данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – URL: http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml
10. Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA). Лаборатория физических наук. Реанализ NCEP/NCAR 2,5°x2,5° – URL: https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html
11. Кац А. Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды/ А. Л. Кац: Гидрометеоиздат, 1960. – 270 с.

VARIABILITY OF SURFACE AIR TEMPERATURE IN THE ARCTIC TERRITORY OF RUSSIA AND ITS RELATION TO CHANGES IN ATMOSPHERIC CIRCULATION

O. N. Toptunova, I. A. Ivanova, O. G. Aniskina, M. A. Motsakov (RSHU), **I. V. Lavrova** (RSHU, «GNINGI» JSC), **T. R. Shishkina** (RSHU, FBI «North-Western UGMS»)

Changes in the coefficient of linear trend of surface air temperature in the Arctic zone of the Russian Federation are considered. Its connection with the components of the general circulation of the atmosphere over three decades is established. A general increase in temperature in the studied region and its connection with changes in circulation in winter were revealed.

УДК 551.583

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА МОРСКУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

С. И. МАСТРЮКОВ, В. Ю. БАХМУТОВ
(АО «ГНИНГИ»)

В настоящем обзоре обобщены основные результаты современных, преимущественно зарубежных, исследований, климатических изменений, потенциально опасных для морской деятельности. Результаты этих исследований широко используются за рубежом при оценке климатических рисков и планировании мер по смягчению последствий от изменений климата в разных сферах человеческой деятельности.

Организация современных международных и отечественных исследований изменения климата

Внимание мирового сообщества к проблемам изменения климата в последние годы продолжает возрастать. На международном уровне этой проблемой с 1988 г. занимается Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК). Ранее мы пытались осветить полученные результаты этих исследований [1, 2]. В 2023 г., был опубликован очередной 6-ой доклад МГЭИК по изменению климата [3].

Отметим, что МГЭИК разделена на три рабочие группы. Первая занимается физическими основами изменения климата, вторая – последствиями изменения климата, адаптацией и уязвимостью, а третья – смягчением последствий изменения климата. Именно по этим направлениям проводятся основные исследования. Помимо этих трёх групп МГЭИК может создавать целевые группы. Кроме того, тысячи ученых по всему миру на безвозмездной основе вносят добровольный вклад в работу МГЭИК. И хотя проблемами изменения климата сейчас занимаются многочисленные профильные организации по всему миру, официальная позиция международного научного сообщества по проблемам изменения климата формируется именно МГЭИК. Особенно важны результаты МГЭИК для стран, где возможность проведения полноценных исследований изменения климата отсутствует.

Текущий 6-ой доклад МГЭИК, подготовленный в марте 2023 г., в основном направлен на оценку прогресса в достижении целей Парижского соглашения о климате 2015 г. [4], Напомним, что это соглашение направлено на существенное сокращение выбросов парниковых газов для ограничения повышения средней глобальной приземной температуры воздуха (СГПТВ) в этом столетии до 2 °С и на поиск средств для еще большего ограничения этого повышения на уровне до 1,5 °С. В 2023 г. предполагается оценить прогресс в достижении целей Парижского соглашения.

6-ой оценочный доклад (6 ОД), как и предыдущие, состоит из резюме для политиков и более подробных технических отчётов с обоснованием полученных выводов для специалистов и ученых.

Впервые выпущенный ОД дополнен Интерактивным атласом [5], что способствует более полному представлению ключевых результатов исследований и

вспомогательной информации об изменении климата как в глобальном, так и в региональном масштабах.

Помимо оценочных докладов, МГЭИК выпускает специальные и методологические документы, относящиеся к рассматриваемой предметной области. Например, в 2019 г. был подготовлен специализированный отчёт «Океан и криосфера в условиях изменения климата»[6], который может представлять особый интерес для стратегического планирования морской деятельности.

За рубежом проблемами изменения климата занимается ряд других научных учреждений самостоятельно или в кооперации. В США это Национальные центры экологической информации (NCEI)NOAA, а в Европе – Морская служба европейской системы оперативной океанографии (Copernicus Marine Environment Monitoring Service – CMEMS) и Служба изменения климата Copernicus (Copernicus Climate Change Service – C3S). C3S публикует ежегодные доклады и даже ежемесячные бюллетени с информацией о текущем состоянии климата [7].

В России ответственность за подготовку докладов об изменении климата возложена на Росгидромет, головная роль отведена ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО»). Первый доклад об изменении климата в России вышел в 2008 г. и стал основой для подготовки Климатической доктрины РФ. В 2014 г. вышел Второй, а в 2022 г. – Третий доклады Росгидромета, в них больше внимания было уделено мерам адаптации к климатическим изменениям [8].

В настоящей работе сделана попытка обобщить некоторые результаты прежде всего «официальных» исследований изменения климата, опубликованных в последние годы и потенциально важных для долговременного планирования военно-морской деятельности.

Численное моделирование климата. Ожидаемые сценарии эмиссии парниковых газов

Результаты 6 ОД МГЭИК базируются в основном на применении ансамбля из 32 климатических моделей Проекта по сравнению объединенных климатических моделей (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 – CMIP6) Всемирной программы по исследованию климата. Эти модели являются моделями третьего поколения и обеспечивают новое и более качественное представление физических, химических и биологических процессов, а также более высокое разрешение по сравнению с климатическими моделями, рассмотренными в предыдущих оценочных докладах МГЭИК (CMIP3, CMIP5). Результаты моделирования хорошо согласуются с данными измерений. Например, среднее отклонение расчёта средней глобальной температуры от данных наблюдений оцениваются в 0,2 °C [9]. В качестве исходных данных для прогноза изменений климата использованы разные сценарии эмиссии парниковых газов и аэрозолей. В 6 ОД сценарии названы по-новому – основные социально-экономические пути (Shared Socio-economic Pathways,SSP), они уточняют предыдущие сценарии концентрации парниковых газов, известные как репрезентативные пути концентрации (Representative Concentration Pathways, RCP). В пять основных сценариев в 6 ОД входят два сценария со снижением выбросов с 2015 г., один – со снижением выбросов с 2050 г. и два сценария – с замедленными темпами роста выбросов (рис. 1).

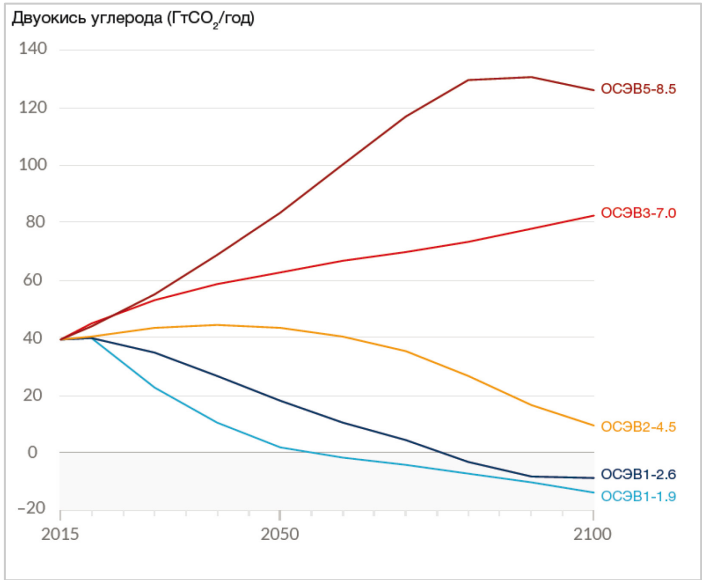


Рис. 1. Основные сценарии среднегодовой эмиссии двуокиси углерода

Палеоклиматические исследования. Причины изменения климата

Доказательства антропогенного воздействия на текущие изменения климата в 6-м докладе усилены. По данным палеоклиматических исследований и инструментальных измерений подтверждено, что глобальные изменения приземной температуры и концентрация парниковых газов тесно взаимосвязаны.

Рост выбросов парниковых газов после Парижского Соглашения 2015 г., где рекомендовано снизить выбросы, продолжается. Некоторое снижение темпов роста выбросов двуокиси углерода в последние 10 лет всё равно не позволяет рассчитывать на реализацию оптимистичных сценариев эмиссии (рис. 1). Концентрация двуокиси углерода в 2022 г. достигла 410 частей на миллион, метана – 1866 частей на миллиард, закиси азота – 332 части на миллиард. Наряду с антропогенными, в условиях потепления появляются новые источники парниковых газов, к числу которых относятся вечная мерзлота, водно-болотные угодья, стихийные пожары. Стоит отметить, что влияние перечисленных дополнительных источников парниковых газов в современных моделях климата учитывается ещё не полностью [3]. Более подробно проблема резкого роста выбросов метана (гипотеза «метангидратного ружья») была рассмотрена в работе [2].

В 6 ОД МГЭИК отмечается, что текущая СГПТВ достигла величин, которых не наблюдалось последние 100 тысяч лет.

Вместе с тем выявлено, что за последние 60 млн. лет отмечались и более существенные изменения [10]. Так, наибольшая концентрация двуокиси углерода отмечалась в начале эоцена 55 млн. лет назад и тогда достигала 1100–2500 частей на миллион, при этом СГПТВ по отношению к референсному (доиндустриальному) периоду 1850–1900 гг. была выше на 10–18°C, а средний уровень океана был выше современного на 70–75 м, постоянного ледяного покрова на планете не было. В эоцене начинается расцвет многих групп млекопитающих. Климат в начале эоцена был влажный и тёплый, леса распространились по всей Земле от полюса до полюса.

Наименьшая концентрация двуокиси углерода отмечалась во время последнего максимума оледенения (19–23 тысячи лет назад). Она составляла 188–194 частей на миллион. При этом СГПТВ была ниже, чем в доиндустриальный период на 5–7 °С, а уровень океана был ниже текущего на 125–134 м. Климат был не только более холодным, но и более сухим, что привело к оледенению и опустыниванию многих регионов, уменьшению площади лесов, гибели животных.

В середине плиоцена (примерно 3 млн. лет назад) концентрация двуокиси углерода достигала 420 частей на миллион, т. е. была немного выше современной. В то время средняя температура воздуха была выше на 2,5–4,0 °С, а уровень океана – на 5–25 м выше, чем в доиндустриальный период.

Показано, что основные естественные факторы изменения климата, включая изменения поступающей солнечной радиации, вулканической активности, орбитальных циклов, изменения глобальных биогеохимических циклов, внутренних циклов климатической системы, таких как Южное колебание (Эль-Ниньо), могут временно изменить темпы роста СГПТВ, но остановить фоновое потепление они не в состоянии.

В 6 ОД утверждается, что средние и экстремальные температуры превысили естественную изменчивость почти во всех регионах Земли. Закисление и деоксигенация океана, рост его теплосодержания, сокращение площади арктического морского льда и ряд других последствий не могут быть вызваны естественными причинами.

Современное состояние климата и его ожидаемые изменения

Приземная температура. Глобальная приземная температура в 2022 г. была на 1,15 °С выше, чем в 1850–1900 гг. (рис. 2). Над сушей она повысилась на 1,59 °С, над океаном – на 0,88 °С. В период 1976–2020 гг. темпы роста средней глобальной температуры составили 0,179 °С / 10 лет, средней температуры над сушей – 0,295 °С / 10 лет, а в России за тот же период темпы роста составили 0,51 °С / 10 лет [8].

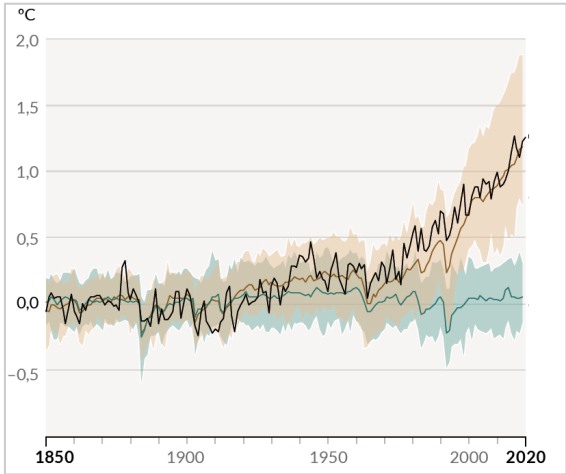


Рис. 2. Изменение средней глобальной приземной температуры: наблюдаемое (черная кривая); смоделированное с учётом антропогенных и естественных факторов (красная кривая); смоделированная с учетом только естественных факторов (зелёная кривая). Заливкой обозначены доверительные интервалы [10]

Наблюдавшееся более медленное повышение СГПТВ в период 1998–2012 гг. было временным. С 2012 г. СГПТВ сильно повысилась, при этом период с 2016–2020 гг. был самым жарким периодом между 1850 и 2020 гг.

Было выявлено, что самые теплые годы, как правило, отмечаются на последней стадии Эль-Ниньо, как это было в 1998 и в 2014 гг. Эль-Ниньо – фаза Южного колебания (ЮК), когда область нагретых приповерхностных приэкваториальных вод Тихого океана смещается к востоку и нарушается обычная циркуляция вод, что влияет на все атмосферные процессы Земли. Интенсивность и период этого явления подвержены сильной изменчивости. Осенью 2023 года прогнозируется, что Эль-Ниньо и потепление поверхности воды в Тихом океане проявятся в полной мере. Это может вызвать рекордное повышение температуры на поверхности Земли в ближайшие полтора-два года.

Действительно, анализ, проведенный C3S Copernicus, показал, что уже июнь 2023 г. был самым теплым июнем в мире, температура превысила рекордную температуру в июне 2019 г. Предыдущий рекорд СГПТВ был превышен на 0,37 °С. Рекордные июньские температуры были отмечены на северо-западе Европы, в ряде районов Канады, США, Мексики, Азии и восточной Австралии. Прохладнее, чем обычно, было над западной частью Австралии, западной частью Соединенных Штатов и западной частью России. Такую аномалию объясняют усилением явления Эль-Ниньо и ждут новых рекордов в 2023 и 2024 гг. [7].

Графики ожидаемых изменений СГПТВ для основных сценариев выбросов приведены на рис. 3. Как видим, сценарий SSP1-1.9 позволяет достичь цели Парижского соглашения 2015 г. и удержать потепление на уровне 1,5°С, а при сценарии SSP1-2.6 – на уровне 2,0°С. Насколько эти сценарии реалистичны, станет известно позже.

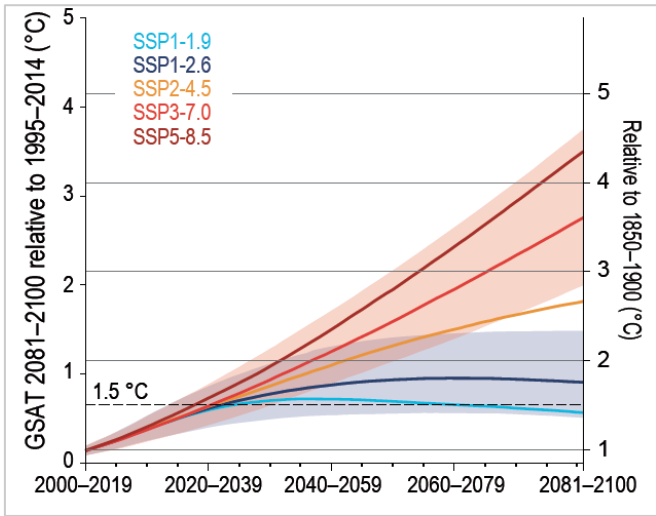


Рис. 3. Ожидаемое изменение СГПТВ для разных сценариев эмиссии парниковых газов [10]

При самом неблагоприятном сценарии SSP5-8.5 потепление СГПТВ превысит 4,3°С. При реализации такого сценария возможны катастрофические последствия для

многих отраслей экономики, что потребует серьезных вложений в меры по адаптации к таким изменениям. Сложный характер климатической системы, неопределённость при выборе сценария выбросов затрудняют точное определение того, как изменится климат, поэтому возрастает значимость адекватной оценки климатических рисков.

Изменения температуры происходят весьма неравномерно. Наибольшее потепление происходит в Арктике и над сушей, что отражает табл. 1, где даны оценки изменений средней температуры в северной Атлантике и в Российской Арктике для двух сценариев эмиссии с помощью Интерактивного атласа МГЭИК [5].

Таблица 1. Региональные оценки среднегодовой региональной температуры по отношению к 1850–1990 гг. по ансамблю моделей CMIP6

Сценарии	2041–2060гг.		2081–2100гг.	
	Северная Атлантика	Российская Арктика	Северная Атлантика	Российская Арктика
SSP1-2.6	1,1	4,6	1,4	5,0
SSP5-8.5	2,9	5,2	5,3	9,4

Рост средней температуры воздуха приводит к росту относительной влажности, к увеличению содержания водяного пара в тропосфере, таянию снега и льда, изменению альбедо и ряда других свойств, и, в целом, неизбежно изменяет состояние всей физической системы Земля.

Атмосфера

Осадки. В последние десятилетия происходит рост количества глобальных осадков над сушей, причем его темпы увеличиваются. Этот прирост по разным источникам данных оценивается в 5–10 мм/год за десятилетие на фоне значительных межгодовой изменчивости и региональной неоднородности. Рост экстремальных суточных осадков оценивается примерно на 7 % на каждый 1 °С глобального потепления. Глобальное потепление приведет к дальнейшей интенсификации муссонных осадков и интенсивности влажных и засушливых событий, но местоположение и частота этих событий зависят от прогнозируемых изменений в региональной атмосферной циркуляции, включая муссоны и траектории циклонов умеренных широт.

Циркуляция атмосферы. С 1980-х годов траектории циклонов умеренных широт сместились в сторону полюсов в обоих полушариях, причем эти тенденции носят ярко выраженный сезонный характер.

Ветер. В 6 ОД МГЭИК отмечается снижение средней скорости ветра в большинстве районов мира. Оценки будущих тенденций изменения ветрового режима имеют низкую степень достоверности в основном за счёт существенной пространственной неоднородности ожидаемых изменений. Например, при повышении СГПТВ на 2 °С диапазон региональных изменений средних региональных изменений скорости ветра лежит в пределах ±10 %.

Экстремальные погодные явления. К этим явлениям относят события, сочетающие разные факторы риска. Примерами могут быть волны жары, сопровождаемые засухами; наводнения, вызванные сочетаниями опасных условий (штормовой нагон и экстремальные осадки и/или речной сток), пожароопасные

условия (сочетание жары и сильного ветра) и т. п. Установлено, что число таких явлений возрастает.

Явления экстремальной жары, в том числе сопровождаемые засухами, стали более частыми и более интенсивными в большинстве регионов суши с 1950-х годов, в то время как явления экстремального холода стали менее частыми и менее суровыми.

За последние четыре десятилетия увеличилась доля сильных тропических циклонов, а зона их максимального развития в северо-западной части Тихого океана сместилась к северу.

В отчёте CMEMS [11] отмечается рост числа штормов в некоторых регионах мира. Отмечено, например, что в 2020 г. усилилась штормовая активность в Средиземном и Чёрном морях, в Северной Атлантике и Индийском океане. Так 19–22 января 2020 г. в Средиземном море шторм «Глория» сопровождался рекордной высотой волн, океанскими течениями и экстремальным наводнением, затопившим сушу на глубину до 3 км, жертвы составили 13 человек, ущерб оценен в 500 млн. евро.

Криосфера

Ледяной щит Гренландии потерял 4890 Гт массы за период с 1992 по 2020 гг., что эквивалентно повышению среднего глобального уровня моря на 13,5 мм. Скорость потери массы достигла 243 Гт/год за 2010–2019 гг. *Антарктический ледяной щит* потерял 2670 Гт массы за период 1992–2020 гг., что эквивалентно повышению глобального среднего уровня моря на 7,4 мм. Скорость потери массы 70 Гт/год за период 2010–2019 гг.

И Гренландский ледяной щит (наверняка), и Антарктический (вероятно) будут продолжать терять массу в течение этого столетия при всех рассмотренных сценариях выбросов.

Вечная мерзлота. В настоящее время площадь глобальной области вечной мерзлоты составляет около 15 % суши Северного полушария и более 50 % не покрытых ледниками земель к северу от 60° северной широты. Две трети территории России покрыто вечной мерзлотой. Её ускоряющаяся деградация приводит к разрушению и проседанию фундаментов и опор, береговых средств навигационного оборудования, арктических гидрометеорологических станций, нарушает нормальную работу всех видов инфраструктуры. Вечная мерзлота глобально прогрелась на 0,29 °С в период с 2007 по 2016 гг. Дальнейшее потепление еще больше усилит таяние многолетней мерзлоты и уменьшение площади сезонного снежного покрова.

При росте СГПТВ до конца столетия на 2 °С к 2100 г. оттает 25% приповерхностного слоя мерзлоты, а к 2200 г. площадь вечной мерзлоты сократится на 29–59 %.

В значительной степени деградация вечной мерзлоты приводит к тому, что на арктическом побережье России наблюдается отступание береговой линии со средней скоростью от 0,5 до 2–5 м/год, при этом максимальная скорость может достигать 100 м/год и более. Как уже отмечалось, увеличение температуры многолетних мерзлых пород сказывается на устойчивости реликтовых газогидратов [2].

Снежный покров. К северу от 60° с. ш. площадь снежного покрова снижается со скоростью 3,5 % за декаду в мае и 13,4 % за декаду в июне. Скорость снижения площади снежного покрова оценивается в 8 % на каждый 1 °С увеличения СГПТВ.

Океан

Температура, соленость, стратификация. Средняя температура поверхности океана (ТПО) в период 1850–1990 гг. повысилась на 0,88°С, причём с 1980 г. рост составил 0,60 °С. При SSP1-2.6 средняя ТПО к 2081–2100 гг. повысится на 0,86 °С, а при SSP5-8.5 –на 2,89 °С. Потепление, вероятно, будет продолжаться по крайней мере до 2300 года, даже для сценариев с низким уровнем выбросов [10, 12].

Морские волны тепла (МВТ), которые могут привести к серьезным воздействиям на морские экосистемы, к 1980 г. стали происходить в 2 раза чаше. При SSP1-2.6 к концу столетия частота МВТ повысится в 4 раза, а при SSP5-8.5 – в 8 раз. Наибольшие изменения произойдут в тропическом океане и Арктическом бассейне.

Солёность в поверхностном слое в районах с высокой соленостью повысилась, а в районы с низкой соленостью – снизилась. Это вызвано неоднородностью изменения количества осадков и величиной испарения.

Водородный показатель pH морской воды с 1890 г. снизился во всем мире на 0,12 и будет продолжать снижаться. При SSP5-8.5 к концу столетия в российской Арктике падение pH по сравнению с доиндустриальным периодом упадёт на 0,6.

Верхний слой океана стал более устойчиво стратифицирован, по крайней мере, с 1970 г. на большей части земного шара, в первую очередь из-за усиленного поверхностного потепления и распреснения поверхности в высоких широтах. Изменения в стратификации океана влияют на вертикальный обмен поверхностных вод с глубинным океаном и крупномасштабную циркуляцию океана. Глобальная стратификация с 1970 г. в слое 0–200 м росла со скоростью 1,3 % в десятилетие. Ожидается, что стратификация верхних слоев океана будет продолжать увеличиваться в течение всего XXI века.

Несмотря на рост стратификации в глобальном масштабе, летняя глубина верхнего перемешанного слоя (ВПС) постоянно увеличивалась по всему земному шару со скоростью 2,9 % за десятилетие, что соответствует общему углублению от 3 до 15 м за десятилетие в зависимости от региона. Вероятно, это вызвано усилением скорости ветра. При сценариях с большими выбросами ожидается обмеление ВПС, за исключением Арктики, где наблюдается углубление ВПС в результате отступления морского льда.

Циркуляция океана. Изменения состояния атмосферы приводит к изменению и циркуляции океана. В частности, прогнозируется ослабление Гольфстрима, смещение к полюсам субтропических круговоротов, изменение интенсивности апвеллинга и скорости некоторых течений. К числу важных последствий, отмеченных в 6 ОД, относится ослабление Атлантической меридиональной опрокидывающей циркуляции (АМОС), называемой также Вертикальным атлантическим меридиональным круговоротом, что и приведёт к ослаблению Гольфстрима. Качественные изменения в системе течений Гольфстрима и АМОС иллюстрирует рис. 4. АМОС обеспечивает мощный поток теплой тропической воды в Северную Атлантику, что помогает поддерживать умеренный европейский климат, позволяя тропикам терять избыточное тепло.

АМОС – это часть глобального океанического конвейера тепла, нарушение этого звена приведёт не только к существенным климатическим, но и важным экологическим последствиям. В связи с недостаточной изученностью этого явления в 6 ОД в отличие от 5 ОД вместо ожидания резкого обвала АМОС до 2100 г. прогноз

изменён на то, что со среднем уровнем уверенности этого события не произойдет. Впрочем, некоторые ученые видят признаки приближающегося коллапса АМОС в текущем столетии [13].

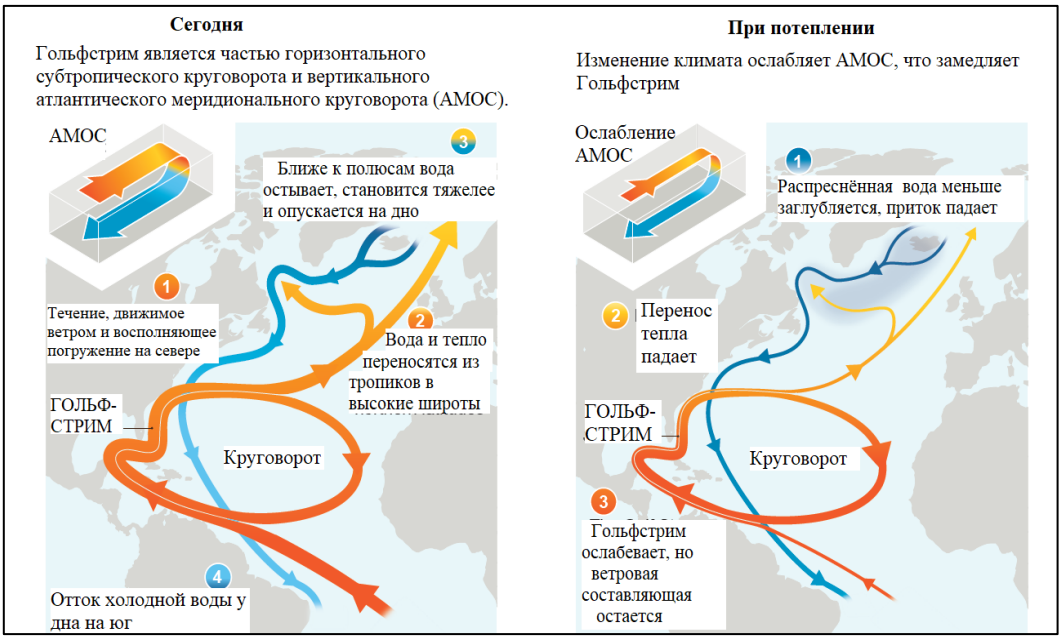
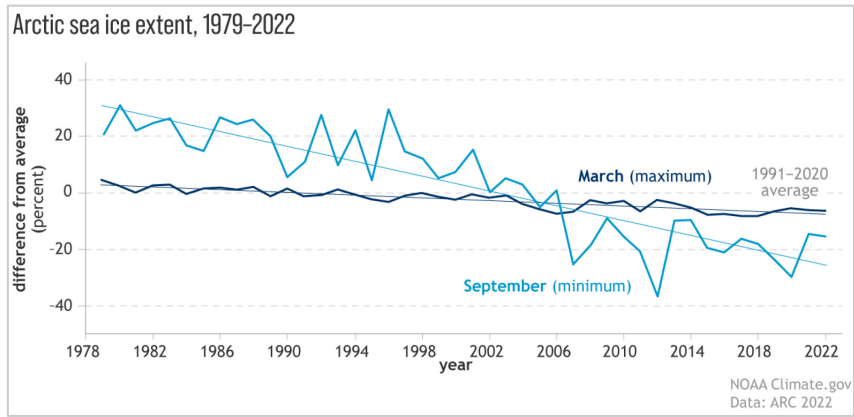


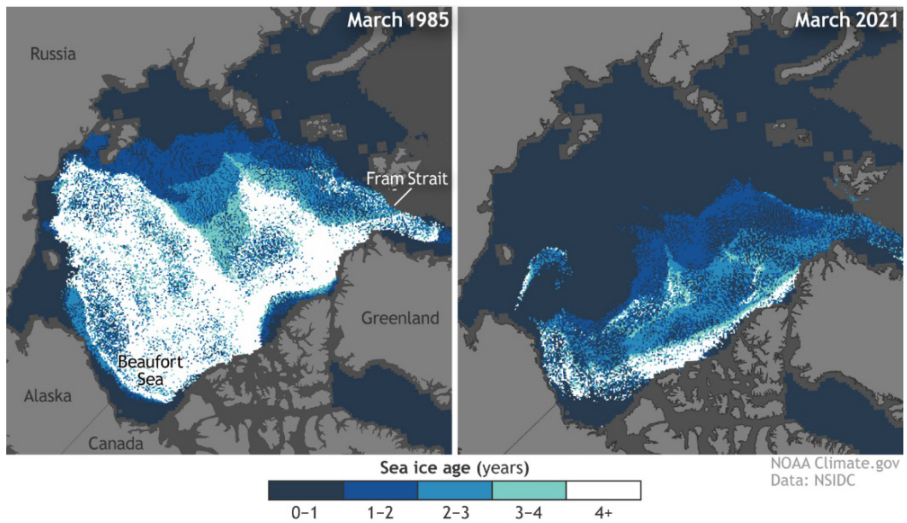
Рис. 4. Механизмы ослабления АМОС и Гольфстрима в условиях потепления климата (Адаптировано: FAQ 9.3, Figure 1 [12])

Волнение. Ужесточение режима ветрового волнения ожидается в Арктических морях в основном за счёт отступания ледяного покрова. Это приведёт к росту эрозии берегов. В остальных районах достоверных изменений волнения не отмечается.

Морской лёд. Влияние человека является основным фактором сокращения площади арктического морского льда. Уменьшение площади и толщины (возраста) арктических льдов иллюстрирует рис. 5. В последнее десятилетие среднегодовая площадь арктического морского льда достигла самых низких значений с 1850 г. С высокой вероятностью эта площадь наименьшая за последние 1000 лет. Площадь ледяного покрова в бассейне Северного Ледовитого океана в период наименьшего развития (сентябрь) сокращается со скоростью 13 % / 10 лет. В марте темпы сокращения площади льда заметно ниже – 3 % / 10 лет (рис. 5*а*). Деградация проявляется и в уменьшении толщины ледяного покрова, что иллюстрирует рис. 5*б*, где показано снижение площади многолетних льдов с 1985 по 2021 гг.



а



б

Рис. 5. Изменения площади (*а*) и толщины/возраста морских льдов (*б*) в Северном Ледовитом океане по данным NSDIC NOAA [14]

В 6 ОД отмечается, что к 2050 г. с высокой степенью вероятности Северный Ледовитый океан в сентябре будет полностью освобождаться ото льда при всех сценариях эмиссии парниковых газов.

В отчётах CMEMS также отмечается значительное смягчение ледового режима. Например, в 2020 г. море Лаптевых вскрылось на месяц раньше, а замёрзло на месяц позже, чем в среднем за 2010–2019 гг. А в Балтийском море зимой 2019/2020 гг. отмечалась минимальная ледовитость начиная с 1720 г. [11].

Изменения среднего уровня моря. Изменения среднего глобального уровня моря (СГУМ) происходят в основном за счёт термического расширения морской воды, таяния ледяных щитов Гренландии и Антарктиды, ледников, изменения речного стока. На эти изменения накладываются региональные изменения уровня, вызванные процессами деформации литосферы. Изменения уровня моря имеют принципиальное значение для морской деятельности, поскольку непосредственно влияют на береговую инфраструктуру, усиливают процессы эрозии, нагоны и наводнения.

СГУМ с 1890 г. поднялся на 21–24 сантиметра. Темпы повышения уровня моря в период 2013–2022гг. увеличились до 4,62 мм/г, что вдвое выше, чем в период 1993–2002 гг. Считается, что за счёт роста среднего уровня моря наводнения во время нагонов и приливов происходят в несколько раз чаще, чем 50 лет назад.

Будущее повышение СГУМ сильно зависит от того, какой сценарий выбросов будет реализован. Рост уровня будет происходить при всех сценариях, но при мягком сценарии SSP1-2.6 к концу столетия он составит 0,43 м, а при сценарии SSP5-8.5 – 0,83 м. К 2300 г. рост СГУМ при сценарии SSP5-8.5 ожидается на уровне 3,6 м.

Выводы

В 6 ОД МГЭИК, по существу, подтверждено, что изменение климата из категории теоретической и далёкой угрозы стали характерной суровой чертой современной реальности. Концентрации парниковых газов продолжают расти, рост СГТПВ к 2022г. по отношению к 1850–1900 гг. уже достиг 1,15 °С. Эти обстоятельства с учётом инерционности климатических изменений вызывают обоснованные сомнения в возможности реализации Парижского соглашения об ограничении глобального потепления на уровне 1,5 °С и даже 2,0 °С до середины текущего столетия. Но даже при этих очень оптимистичных сценариях будет наблюдаться увеличение повторяемости ряда погодных экстремальных событий и сохраняться основные современные тенденции изменения климата.

В случае реализации негативного сценария SSP5-8.5 рост глобальной температуры превысит 4 °С, а в Российской Арктике – почти 10°С. По мере приближения количества выбросов к этому сценарию существующие тенденции изменения климата будут усиливаться. Естественная изменчивость климата будет накладываться на эти фоновые тенденции, усиливая или несколько ослабляя их. Неизбежно возрастёт повторяемость экстремальных и опасных погодных условий, усилятся тенденции деградации арктических льдов, вечной мерзлоты, роста уровня моря, эрозии берегов и других процессов, оказывающих существенное влияние на все виды человеческой деятельности, включая морскую деятельность.

В очередном 6 ОД МГЭИК отмечена недостаточная изученность некоторых процессов, вызванных глобальным потеплением. Наиболее опасны те процессы, которые способны привести к резкому изменению климата. А именно резкие изменения являются наиболее опасными, так как к ним не будет времени адаптироваться. К таким процессам можно отнести высвобождение метана на арктическом шельфе и резкое ослабление Гольфстрима и Атлантической меридиональной опрокидывающей циркуляции, вызванное глобальным потеплением и распреснением верхнего слоя океана.

Изменения климата могут иметь не только отрицательные, но и положительные последствия. Эти изменения будут оказывать как прямое, так и опосредованное влияние и на объекты морской инфраструктуры и все аспекты морской деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мастрюков С. И., Червякова Н. В. Краткий обзор исследований в области изменений климата и оценки их влияния на военно-морскую деятельность // Навигация и гидрография, 2014. – № 37. – С. 81–92.
2. Мастрюков С. И., Лаврова И. В. Система НГГМО в условиях изменения климата в Арктике: причины изменений // Навигация и гидрография, 2018. – № 54. – С. 83–92.

3. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 p.
4. Сайт ООН. Парижское соглашение. URL: https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement.
5. Сайт МГЭИК. IPCC WGI Interactive Atlas. URL: https://interactive-atlas.ipcc.ch/.
6. Сайт МГЭИК. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. – URL: https://www.ipcc.ch/srocc.
7. Сайт Climate change service. Copernicus. Climate Bulletins. Highlights of the latest monthly summaries – URL: https://climate.copernicus.eu/climate-bulletins/.
8. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. – 124 с.
9. Сайтпроекта Program for climate model diagnosis & intercomparison. CMIP6 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 6. URL: https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/.
10. Arias P.A. et al. Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. Pp. 33−144. https://doi.org/:10.1017/9781009157896.002.
11. von Schuckmann, K., Le Traon P.-Y., Smith N., Pascual A., Djavidnia S., Brasseur P., Grégoire M. (Eds.). Copernicus Ocean State Report. – 2022.– Issue 6.– Journal of Operational Oceanography, 15:sup1, s1–s220. DOI: https://doi.org/10.1080/ 1755876X.2022.2095169.
12. Fox-Kemper B., Hewitt H.T., Xiao C. et al. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021 . Pp. 1211–1362. DOI:https://doi.org/10.1017/9781009157896.011.
13. Boers N. Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. Nat. Clim. Chang. – 2021. – No 11. – 680–688. DOI: https://doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4/
14. Сайт Climate.gov. Climate Change: Arctic sea ice summer minimum. – URL: https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-arctic-sea-ice-summer-minimum.

RESULTS OF MODERN RESEARCH OF CLIMATE CHANGE AFFECTING MARINE ACTIVITIES

S. I. Mastryukov, V. Yu. Bakhmutov («GNINGI» JSC)

This review summarizes the main results of modern, mainly foreign, research on climate change, potentially dangerous for marine activities. The results of these research are widely used abroad in assessing climate risks and planning measures to mitigate the effects of climate change in various spheres of human activity.

УДК 551.501.74

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАЧНОСТИ В НЕОСВЕЩЕННЫХ В МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ ОТНОШЕНИИ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

А. А. БОРИСОВ, А. Б. МАКОВ
(ВКА имени А. Ф. Можайского)

На основе выявленной статистической зависимости между количеством, высотой нижней границы облаков и характеристиками полей давления и ветра предложен метод, позволяющий оценить характеристики полей облачности в районах, неосвещенных в метеорологическом отношении

Введение

Облачность, рассматриваемая как совокупность облаков над некоторым физико-географическим районом, представляет собой фактор, во многих случаях определяющий возможность осуществления человеком отдельных видов деятельности в данной местности.

Прежде всего следует упомянуть об использование авиации, поскольку облачность зачастую определяет возможность взлета и посадки воздушного судна, а также возможность его полета на заданном эшелоне. Также наличие облачности затрудняет проведение дистанционного зондирования земной поверхности из космоса и ведение поисковых работ с использованием авиационной техники. Кроме того, с некоторыми видами облаков связаны такие опасные явления погоды, как сильный дождь (снег), гроза, град, шквал. Поэтому оценивания текущих и предсказание ожидаемых характеристик облачности над рассматриваемой территорией является важнейшей задачей, решаемой авиаметеорологическими подразделениями.

Наибольшие трудности при учете влияния облачности на хозяйственную деятельность человека возникают в физико-географических районах с редкой сетью наблюдательных метеорологических станций. К таким районам можно отнести акватории морей и океанов, а также территории с неблагоприятными климатическими условиями для постоянного проживания человека. В Российской Федерации (РФ) к подобным физико-географическим районам можно отнести территории, расположенные за Полярным кругом, и акватории оконечных морей, входящих в бассейн Северного Ледовитого океана.

Несмотря на то, что задача оценивания характеристик облачности для большей части физико-географических районов РФ, недостаточно освещенных в метеорологическом отношении, в настоящее время успешно решается с помощью космической составляющей Глобальной системы наблюдений Всемирной метеорологической организации, сложная внешнеполитическая обстановка, а также низкая плотность наблюдательной сети в арктических районах и отсутствие у РФ полностью развернутых отечественных группировок метеорологических искусственных спутников Земли (МИСЗ) на солнечно-синхронных и высокоэллиптических орбитах ставят под угрозу решение данной задачи над районами Российской Арктики.

В настоящей статье представлены результаты разработки метода оценивания характеристик облачности (количества и высоты нижней границы) над физико-географическими районами, неосвещенными в метеорологическом отношении, на основе использования предварительно восстановленных полей давления на уровне моря и геопотенциала на изобарических поверхностях 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа.

Основные математические соотношения для оценивания характеристик облачности

Предлагаемый метод оценивания характеристик облачности основан на выявленной статистической зависимости между количеством, высотой нижней границы облаков (ВНГО) и характеристиками полей давления и ветра [1].

Для оценивания количества облачности и ВНГО в качестве исходных данных можно использовать характеристики восстановленных над неосвещенными в метеорологическом отношении физико-географическими районами полей давления и ветра, которые в векторном виде можно представить следующим образом:

$$\mathrm{C} = \langle \Delta p + \delta p, v_0, v_{850}, u_{700}, w_{700} \rangle,$$

где Δp – лапласиан давления на уровне моря; δp– величина барической тенденции; v_0и v_{850} – скорость ветра на уровне моря и на изобарической поверхности 850 гПа; u_{700}, w_{700} – зональная и меридиональная составляющие скорости ветра на изобарической поверхности 700 гПа.

Для получения оценок количества облачности и высоты ее нижней границы согласно Методическим рекомендациям [2], используются соответственно дискриминантные и регрессионные функции следующего вида:

$$D_i = a_{i0} + a_{i1}(\Delta p + \delta p) + a_{i2}v_0 + a_{i3}v_{850} + a_{i4}u_{700} + a_{i5}w_{700}, \qquad (1)$$

$$h_{\text{ВНГО}} = b_0 + b_1(\Delta p + \delta p) + b_2 v_0 + b_3 v_{850} + b_4 u_{700} + b_5 w_{700} \otimes, \qquad (2)$$

где $i = 1{,}2$; $a_{ij}, j = 0(1)7$ – коэффициенты дискриминантной функции; $b_{ij}, j = 0(1)7$ – коэффициенты уравнения регрессии.

Значения коэффициентов дискриминантных и регрессионных функций представлены соответственно в табл. 1, 2.

Таблица 1. Значения коэффициентов дискриминантных функций

п/п	D_i	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i4}	a_{i5}
1	D_1	-3,18	-0,28	0,49	0,25	-0,03	0,04
2	D_2	-2,92	-0,16	0,57	0,24	-0,01	0,03

Таблица 2. Значения коэффициентов уравнений регрессии

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
2,84	-0,13	0,02	0,16	-0,06	-0,03

Лапласиан давления у земли рассчитывается по пятиточечной схеме:

$$\Delta p = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 - 4p_0. \quad (3)$$

Значения u_{700} и w_{700} вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} u_{700} &= v_{700}\cos\phi_{700}, \\ w_{700} &= v_{700}\sin\phi_{700}, \end{aligned} \quad (4)$$

где v_{700}– значение скорости ветра на изобарической поверхности 700 гПа; ϕ_{700}– угол, отсчитываемый против хода часовой стрелки от направления на восток до вектора скорости ветра.

Для реализации соотношений (1) – (4) необходимы характеристики восстановленных над неосвещенными в метеорологическом отношении физико-географическими районами полей давления и ветра у поверхности земли и на изобарических поверхностях 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа. Для восстановления полей этих метеорологических величин на основных изобарических поверхностях 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа различными авторами исследований использовались физико-статистический, гидродинамический и динамико-стохастический подходы.

Так, в работах [3–5] авторами в основу предложенных методик и алгоритмов был положен комплексный подход, базирующийся на процедуре оптимального комплексирования альтернативных методов прогнозирования, а именно: метода оптимальной экстраполяции и модифицированного метода группового учета аргументов. Статистическое оценивание качества такой процедуры, проведенное применительно к прогнозу мезомасштабных полей температуры и ветра, показало, что она дает вполне приемлемые для практики результаты.

В работе [6] для восстановления полей метеорологических величин на недоступных наблюдениям территориях автор предлагает использовать методы теории оптимального оценивания, основанные на применении аппарата калмановской фильтрации и различных динамико-стохастических моделей, описывающих поведение метеорологических объектов в пространстве и во времени. В рамках теории оптимального оценивания автором работы разработана малопараметрическая модель динамико-стохастического типа, основанная на учете корреляционных свойств метеорологических полей в области мезомасштаба за счет оценки неизвестных характеристик в уравнениях состояния. На ее основе разработаны методика и алгоритм пространственной экстраполяции мезометеорологических полей.

Анализируя приведенные выше работы, можно отметить, что задача восстановления полей метеорологических величин в свободной атмосфере с приемлемым для практического использования качеством решена успешно.

Для восстановления поля атмосферного давления у поверхности земли при расчете значения Δp могут использоваться соотношения, полученные в работе [7] из соотношений для расчёта геопотенциальной высоты H_p на изобарической поверхности p. Они представлены в Руководстве [8]:

$$\begin{aligned} H_{850} &= h(p_{\text{ум}} - 1000) + 128 + 0{,}5T_{\text{пз}} + 3(0{,}5 - \gamma_{\text{пз}/850}) \\ H_{700} &= h(p_{\text{ум}} - 1000) + 278 + T_{\text{пз}} + 15(0{,}5 - \gamma_{\text{пз}/700}) \ , \\ H_{500} &= h(p_{\text{ум}} - 1000) + 528 + 2T_{\text{пз}} + 50(0{,}5 - \gamma_{\text{пз}/500}) \end{aligned} \quad (5)$$

где $T_{пз}$, (°C)– температура воздуха у поверхности Земли в пункте оценивания H_p; $\gamma_{пз/p}(°C/100\text{ м})$ – средний вертикальный градиент температуры между поверхностью земли и рассматриваемой изобарической поверхностью p; $p_{ум}$ (гПа) – давление на уровне моря; h (гп. дам) – динамическая барическая ступень.

Получаемое из выражения (5) соотношение (6) позволяет рассчитать давление у поверхности земли в искомой точке:

$$p_{пз} = \frac{1}{h}(H_{850} - H_{700} + H_{500} + 1000h + 3\gamma_{пз/850} + 50\gamma_{пз/500} - 15\gamma_{пз/700} - 397) \quad (6)$$

Значения переменной h для осуществления расчетов по формуле (6) получают из табл. 3, приведенной в работе [7].

Таблица 3. Значения динамической барической ступени в зависимости от приземной температуры [7]

№ п/п	$T_{пз}$, (°C)	h (гп. дам)
1	Выше 15°	0,9
2	От 15 до – 15°	0,8
3	От –15 до – 40°	0,7
4	Ниже – 40°	0,6

Для определения температуры $T_{пз}$, (°C) в рассматриваемом физико-географическом районе и значений $\gamma_{пз/p_0}$, входящих в выражение (6), предлагается использовать эмпирическую модель атмосферы NRLMSISE-2000 [9] или климатическую информацию для рассматриваемого географического района.

Поскольку в работах [3, 4, 6] восстановление поля геопотенциала на изобарических поверхностях 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа осуществляется для узлов регулярной сетки, соответственно, восстановление поля давления $p_{ум}$ и оценивание характеристик облачности также будет происходить для этих же узлов.

Таким образом, использование соотношений (1) – (4) и (6) позволяет оперативно-прогностическим подразделениям оценить характеристики облачности над неосвещенными в метеорологическом отношении физико-географическими районами.

Метод оценивания характеристик облачности в неосвещенном в метеорологическом отношении физико-географическом районе

На основе соотношений (1) – (4), (6) разработан метод оценивания характеристик облачности в неосвещенном в метеорологическом отношении физико-географическом районе. Схема разработанного метода представлена на рис. 1.

Входной информацией для данного метода являются метеорологические данные на основных изобарических поверхностях 850 гПа, 700 гПа, 500 гПа из районов, граничащих с областями, неосвещенными в гидрометеорологическом отношении.

Содержание разработанного метода следующее.

Блок № 1. Используя вспомогательную информацию, например работу [6], находятся оценки полей геопотенциала (H_p) на основных изобарических поверхностях

850, 700, 500 гПа в узлах регулярной сетки над районом, неосвещенным в метеорологическом отношении.

Блок № 2. С использованием эмпирической модели NRLMSISE-2000 в узлах регулярной сетки оценивается температура ($T_{\text{пз}}$) воздуха у поверхности земли. С ее использованием в **блоке № 3** по табл. 1 оцениваются значения динамической барической ступени (h).

Блок № 4. С помощью эмпирической модели NRLMSISE-2000 находятся оценки градиента температуры воздуха от поверхности Земли до высот основных изобарических поверхностей 850, 700, 500 гПа в узлах регулярной сетки.

Блок № 5. С помощью соотношения (6) в узлах регулярной сетки находятся оценки $p_{\text{пз}}$.

Блок № 6. С помощью соотношений (3) и (4) находятся соответственно значения лапласиана давления у поверхности земли и скорости ветра на изобарической поверхности 700 гПа.

Блок № 7. С помощью соотношений (1) находятся значения дискриминантных функций D_1 и D_2. Затем производится их сравнение. Если выполняется соотношение $D_1 > D_2$, то количество облачности прогнозируется больше двух баллов, и после этого производится оценивание ВНГО по соотношению (2).

Рис. 1. Схема метода оценивания характеристик облачности в неосвещенном в метеорологическом отношении физико-географическом районе

Результаты проверки работоспособности предложенного метода

Для проверки работоспособности предложенного в настоящей работе метода оценивания характеристик облачности был проведен численный эксперимент. Его содержание заключалось в следующем: по восстановленным полям геопотенциала на изобарических поверхностях 850, 700, 500 гПа за 21.05.2003 г. оценивалась общее количество и ВНГО облаков для района г. Мурманск.

В соответствии со схемой метода, приведенной на рис. 1, оценивание характеристик облачности проводилось следующим образом:

1) в качестве восстановленных данных на изобарических поверхностях 850, 700, 500 гПа были использованы данные реанализа [10] за 12.00 GMT 21.05.03 г.;

2) для оценивания $T_{\text{ПЗ}}$ была использована эмпирическая модель NRLMSISE-2000, в районе г. Мурманска наблюдалась $T_{\text{ПЗ}} = 14\ °\text{C}$;

3) в соответствии с данными табл.1 $h = 0{,}8$ гп. дам;

4) для оценивания $\gamma_{\text{ПЗ}/p}$ была использована эмпирическая модель NRLMSISE-2000, в районе г. Мурманска $\gamma_{\text{ПЗ}/850} = \gamma_{\text{ПЗ}/700} = \gamma_{\text{ПЗ}/500} = 0{,}6$;

5) значения давления на уровне моря в узлах регулярной сетки, вычисленные по соотношению (6), представлены на рис. 2;

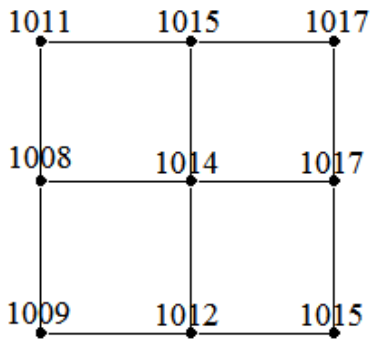


Рис. 2. Значения давления на уровне моря в узлах регулярной сетки

6) неизвестные значения v_{850} и v_{700}, необходимые для проведения расчетов по формуле (4), были получены с помощью модели HWM-93 [9]: $v_{850} = 14$ м/с, $v_{700} = 8$ м/с. Тогда $u_{700} = 1{,}2$ м/с, а $w_{700} = -6{,}9$ м/с. Значение лапласиана $\Delta p + \delta p = -7{,}0$;

7) $D_1 = 5{,}08$, $D_2 = 4{,}6$, $D_1 > D_2$ – количество облачности больше 2 баллов. $h_{\text{ВНГО}} = 6{,}4$, следовательно, ВНГО равна 640 м.

Данные метеорологических наблюдений за 21.05.2003 г. 12.00 GMT свидетельствуют о наличии в районе г. Мурманска низкой облачности с ВНГО 300–600 м, наблюдался дождь.

Таким образом, результаты оценивания характеристик облачности, полученные с использованием разработанного метода оценивания, близки к фактически наблюдавшимся в рассматриваемом физико-географическом районе.

Заключение

Представленный в настоящей статье метод оценивания характеристик облачности в неосвещенном в метеорологическом отношении физико-географическом районе может быть использован на практике оперативно-прогностическими подразделениями, обеспечивающими гидрометеорологической информацией потребителя, чья деятельность осуществляется в труднодоступных для проведения регулярных метеорологических наблюдений физико-географических районах. Это прежде всего метеорологические и гидрометеорологические подразделения, обеспечивающие функционирование, соответственно, авиации и флота различной ведомственной принадлежности в условиях Крайнего Севера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометиздат, 1977. – 712 с.
2. Методические рекомендации метеоподразделениям авиации Вооруженных сил СССР / Под ред. Г. С. Карпова. – М.: Военное издательство. – 1989. – 112 с.
3. Комаров В. С., Креминский А. В. // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8. – № 7. – С. 958–965.
4. Комаров В. С., Креминский А. В., Попов Ю. Б. Применение комплексной методики прогнозирования в задачах пространственной экстраполяции мезометеорологических полей на неосвещенную данными наблюдений территорию // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Т. 11. – № 8. – С. 808–819.
5. Комаров В. С., Кураков В. А., Попов Ю. Б., Суворов С. С. Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – 236 с.
6. Ильин С. Н. Динамико-стохастический метод пространственной экстраполяции метеорологических полей в области мезомасштаба. Дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.29: защищена 25.02.05. – Томск, 2005. – 129 с.
7. Борисов А. А., Кулешов Ю. В., Маков А. Б. Метод диагностики поля приземного давления в неосвещенном в метеорологическом отношении физико-географическом районе // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2020. – № 674. – С. 109–116.
8. Белоусов С. Л., Васильев А. А., Вельтищев Н. Ф., Леонов Н. Г. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. – Л.: Гидрометиздат, 1986. – 696 с.
9. Upper Atmosphere Model: [Электронный ресурс]. URL: https://uamod.wordpress.com. (Дата обращения:21.05.2023).
10. Архив исследовательских данных (RDA). Реанализ ERA5 (сетка широта-долгота 0.25 градуса). [Электронный ресурс] / URL: https://rda.ucar.edu/datasets.

METHOD OF ESTIMATION OF CLOUD COVER CHARACTERISTICS IN METEOROLOGICALLY UNLIT PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL AREAS

A. A. Borisov, A. B. Makov (A. F. Mozhaisky Military Space Academy)

Based on the revealed statistical relationship between the number, height of the lower boundary of clouds and the characteristics of pressure and wind fields, a method is proposed that allows us to evaluate the characteristics of cloud fields in areas that are not illuminated in meteorological terms.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АЛЕКСЕЕВА Екатерина Геннадьевна,
старший преподаватель кафедры Метеорологических прогнозов ФГБОУ ВО «РГГМУ».

E-mail: E.Alekseeva-rshu@yandex.ru

Ekaterina G. ALEKSEEVA,
Senior Lecturer of the Department of Meteorological forecasts, Russian State Hydrometeorological University.

E-mail: E.Alekseeva-rshu@yandex.ru

АНИСКИНА Ольга Георгиевна,
зав. кафедрой Метеорологических прогнозов ФГБОУ ВО «РГГМУ», канд. физ.-мат. наук, доцент.

E-mail: olga.aniskina@mail.ru

Olga G. ANISKINA,
Head of the Department of Meteorological forecasts of the Russian State Hydrometeorological University, reader, CandSc,

E-mail: olga.aniskina@mail.ru

БАХМУТОВ Владимир Юрьевич,
начальник НИОЦ АО «ГНИНГИ», канд. воен. н.

E-mail:info@gningi.ru

Vladimir Y. BAKHMUTOV,
chief of Research oceanographic center (ROC), «GNINGI» JSC, CandSc.

E-mail:info@gningi.ru

БОРИСОВ Алексей Анатольевич,
преподаватель кафедры ФГБУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского», кандидат технических наук, доцент.

E-mail: alebor_72@mail.ru

Aleksey A. BORISOV,
Teacher of the department, A.F. Mozhaisky Military Space Academy, CandSc, reader.

E-mail: alebor_72@mail.ru

ГОРДЕЕВА Екатерина Александровна,
старший научный сотрудник АО «ГНИНГИ».

E-mail: ka_pir@mail.ru

Ekaterina A. GORDEEVA,
Senior Researcher, the Researcher Oceanographic Center, «GNINGI» JSC.

E-mail: ka_pir@mail.ru

ДОРОНИН Александр Павлович,
профессор ФГБУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского», докт. техн. н., профессор.

E-mail: doronin52@mail.ru

Alexandr P. DORONIN,
Professor, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, DSc., Professor.

E-mail: doronin52@mail.ru

ЕФИМОВА Юлия Викторовна,
доцент кафедры Метеорологических прогнозов ФГБОУ ВО «РГГМУ», канд. геогр. н.

E-mail: luluef@mail.ru

Yulia V. EFIMOVA,
Associate Professor of the Department of Meteorological forecasts, Russian State Hydrometeorological University, CandSc.

E-mail: luluef@mail.ru

ИВАНОВА Ирина Александровна,
старший преподаватель кафедры метеорологических прогнозов ФГБОУ ВО «РГГМУ».

E-mail: ira.nova@mail.ru

Irina A. IVANOVA,
Senior Lecturer of the Department of Meteorological forecasts, Russian State Hydrometeorological University.

E-mail: ira.nova@mail.ru

КОЗЛОВА Наталья Александровна,
научный сотрудник ФГБУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского».

E-mail: cozlowa.nat2012@yandex.ru

Natalya A. KOZLOVA,
Researcher, A. F. Mozhaisky Military Space Academy.

E-mail: cozlowa.nat2012@yandex.ru

КОЛОБОВ Евгений Владиславович,
ведущий специалист НИОЦ АО «ГНИНГИ».

E-mail: logistmira@yandex.ru

КОСТЕНИЧ Александр Валерьевич,
ведущий научный сотрудник НИОЦ АО «ГНИНГИ», канд. техн. н.

E-mail: alkostenich@mail.ru

ЛАВРОВА Ирина Викторовна,
доцент кафедры Метеорологических прогнозов ФГБОУ ВО «РГГМУ», ведущий научный сотрудник НИОЦ АО «ГНИНГИ», канд. геогр. н.

E-mail: livspb@yandex.ru

МАКОВ Александр Борисович,
профессор кафедры ФГБУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского», доктор технических наук, доцент.

E-mail: vokat1@rambler.ru

МАСТРЮКОВ Сергей Иванович,
ведущий научный сотрудник НИОЦ АО «ГНИНГИ», докт. техн. н.

E-mail: mastr_si@mail.ru

МИЛЯКОВ Денис Федорович,
инженер 1 категории АО «Научный центр прикладной электродинамики», канд. технических наук.

E-mail: denism@navis.ru

МОЦАКОВ Максим Анатольевич,
заведующий лабораторией гидродинамического моделирования ФГБОУ ВО «РГГМУ», кандидат физико-математических наук.

E-mail: maxim.motsakov@mail.ru

НЕКРАСОВ Сергей Николаевич,
старший научный сотрудник АО «ГНИНГИ», докт. техн. н., профессор

E-mail: snn00707@rambler.ru

ПЕТРОЧЕНКО Вячеслав Михайлович,
доцент ФГБУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского», канд. техн. н., доцент.

E-mail: vmpetrochenko@mail.ru

СТАВРОВ Константин Георгиевич,
главный научный сотрудник НИОЦ АО «ГНИНГИ», докт. техн. н., профессор.

E-mail: stavrov@gningi.ru

Evgeny V. KOLOBOV,
Leading Specialist, ROC, «GNINGI» JSC.

E-mail:logistmira@yandex.ru

Aleksander V. KOSTENICH,
leading researcher «GNINGI» JSC, CandSc.

E-mail: alkostenich@mail.ru

IrinaV. LAVROVA,
Associate professor of the Department of Meteorological forecasts RSHU, leading researcher of the Research Oceanographic Center, «GNINGI» JSC,CandSc.

E-mail: livspb@yandex.ru

Alexandr B. MAKOV,
Associate professorof A.F. Mozhaisky Military Space Academy, professor of the department; doctor of technical sciences.

E-mail: vokat1@rambler.ru

Sergey I. MASTRYUKOV,
leading researcher, Research Oceanographic Center, «GNINGI» JSC, DSc.

E-mail: mastr_si@mail.ru

Denis F. Milyakov,
1st category engineer, Scientific Center of Applied Electrodynamics, JSC.

E-mail: denism@navis.ru

Maxim A. MOTSAKOV,
Head of the Laboratory of Hydrodynamic Modeling, Russian State Hydrometeorological University, CandSc.

E-mail: maxim.motsakov@mail.ru

Sergey N. NEKRASOV,
senior researcher «GNINGI» JSC, DSc, professor.

E-mail: snn00707@rambler.ru

Vyacheslav M. PETROCHENKO,
Associate professor, A.F. Mozhaisky Military Space Academy,CandSc.

E-mail: vmpetrochenko@mail.ru

Konstantin G. STAVROV,
Head researcher of the Research oceanographic center (ROC), «GNINGI» JSC, DSc, professor.

E-mail: stavrov@gningi.ru

СТЕПАНОВ Алексей Петрович,
доцент Факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, канд. техн.х наук.; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

E-mail: office@eprib.spb.ru

ТОПТУНОВА Ольга Николаевна,
доцент кафедры Метеорологических прогнозов ФГБОУ ВО «РГГМУ», канд. физ.-матем. н.

E-mail: olgakolp@yandex.ru

ШИШКИНА Татьяна Романовна,
синоптик 2 категории ФГБУ «Северо-Западное УГМС», специалист по учебно-методической работе ФГБОУ ВО «РГГМУ».

E-mail: t.shishkina@rshu.ru

ЩУКИН Георгий Георгиевич,
ведущий научный сотрудник АО «ГНИНГИ», доктор физ.-мат. наук, профессор; Заслуженный деятель науки РФ.

E-mail: ggshchukin@mail.ru

Alexey P. STEPANOV,
CandSc, ITMO University, Associate Professor; Concern «Electropribor».

E-mail: office@eprib.spb.ru

Olga N. TOPTUNOVA,
Associate Professor of the Department of Meteorological forecastsof the Russian State Hydrometeorological University,CandSc.

E-mail: olgakolp@yandex.ru

Tatyana R. SHISHKINA,
forecaster of the 2nd category of the FBI "North-Western UGMS", specialist in educational and methodological work of the FSBI VO "RGGMU".

E-mail: t.shishkina@rshu.ru

Georgy G. SHCHUKIN,
Senior researcher of «GNINGI» JSC, DSc, professor. Honored scientist of the Russian Federation.

E-mail: ggshchukin@mail.ru

РЕФЕРАТЫ

УДК.656.61.052

Мировые тенденции развития морских дифференциальных подсистем в последнее десятилетие. Д. Ф. Миляков. – Навигация и гидрография. – 2023. – № 72. – С. 7–11.

По результатам анализа бюллетеней Международной ассоциации маячных служб рассмотрены мировые тенденции изменений в развитии морских дифференциальных подсистем.

Ключевые слова: морские дифференциальные подсистемы, контрольно-корректирующие станции, морской транспорт, дифференциальный сервис, ГНСС, ГЛОНАСС, GPS.

УДК 629.12.001.2

Современные методы идентификации моделей областей навигационной безопасности. С. Н. Некрасов. – Навигация и гидрография. – 2023. – № 72. – С. 12–23.

Приведен обзор методов оценки дистанций расхождения судов на базе экспертных методов, методов интеллектуального анализа на основе случайных лесов и методов, основанных на прогнозе взаимного положения судов и представления судна в виде области, характеризующей качество управления и влияния природных морских условий. Показана связь изменчивости относительной скорости расхождения со случайными погрешностями прогноза положения судов при расхождении. Произведено сравнение достоинств и недостатков методов оценки предполагаемых дистанций расхождения судов. Обоснованы подходы к количественной оценке текущих навигационных рисков расхождения судов.

Ключевые слова: области навигационной безопасности, экспертные методы оценки дистанций расхождения судов, интеллектуальный многомерный апостериорный анализ дистанций расхождение судов, случайные леса, навигационные риски.

УДК 524.1+629.05

Достижения ядерной физики в свете решения задачи определения местоположения подвижного объекта с помощью релятивистских частиц. А. П. Степанов. – Навигация и гидрография. – 2023. – № 72. – С. 24–57.

Рассматриваются достижения ядерной физики и смежных прикладных областей науки и техники в свете возможности их применения для повышения помехоустойчивости, точности и автономности определения и уточнения местоположения подвижных объектов. Приводятся данные о существующих разработках и их применении. Рассматриваются вероятные перспективы развития данного направления.

Ключевые слова: инерциальная навигация, нейтрино, мюон, ускоритель, мюонография.

УДК 551.46+347.79

Основные результаты гидрографических исследований по обоснованию внешней границы континентального шельфа российской федерации в период 1998–2023 гг. В. Ю. Бахмутов, Е. А. Гордеева Е. В. Колобов, А. В. Костенич, К. Г. Ставров. – Навигация и гидрография. – 2023. – № 72. – С. 58–63.

Описываются основные результаты гидрографических исследований, выполненных под руководством и при участии ученых и специалистов Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института, в интересах обоснования внешней границы континентального шельфа России в Арктике за последние 25 лет.

Ключевые слова: Граница континентального шельфа, морские научные исследования, Северный Ледовитый океан, батиметрическая карта.

УДК 551.515.2 556.113.2

Влияние температуры поверхности океана на формирование тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана. И. В. Лаврова, О. Н. Топтунова, Т. Р. Шишкина, Е. Г. Алексеева, Ю. В. Ефимова. – Навигация и гидрография. – 2023. – № 72. – С. 64–75.

Температура поверхности океана (ТПО) относится к одному из главных факторов, оказывающих влияние на формирование и развитие тропических циклонов. Известно, что тропические циклоны формируются при ТПО выше 26°С. В данной работе показано, что в момент возникновения циклонов существует и верхний предел температуры воды на поверхности – 31°С. В таких случаях начинает работать другой фактор, отмечаются более высокие поля давления, и формирование циклонов не происходит. За последние 50 лет в северо-западной части Тихого океана в районе формирования тропических циклонов наблюдается повышение ТПО во все сезоны на 0,15–0,16°С /10 лет. Если предположить, что тенденция в будущем будет сохраняться, то можно ожидать, что в летний период тропические циклоны будут формироваться значительно реже, с меньшей интенсивностью и продолжительностью.

Ключевые слова: Тропические циклоны, тайфуны, температура поверхности океана, атмосферное давление, Северо-Тихоокеанский антициклон, северо-западная часть Тихого океана.

УДК 551.576.2:551.583

Методологический подход к обоснованию принятия решения о рассеянии переохлажденных волнистообразных облаков нижнего яруса на основе данных наземных измерений. А. П. Доронин, Н. А. Козлова, В. М. Петроченко, Г. Г. Щукин – Навигация и гидрография. – 2023. – № 72. – С. 76–86.

В статье приводятся результаты исследований по разработке методического подхода к обоснованию принятия решения о рассеянии переохлажденных волнистообразных облаков нижнего яруса на основе данных наземных измерений.

Ключевые слова: облака нижнего яруса, измерения, зондирование атмосферы, метеорологические условия.

УДК 551.582 504.38

Изменчивость приземной температуры воздуха на Арктической территории России и ее связь с изменениями циркуляции атмосферы. О. Н. Топтунова, И. А. Иванова, О. Г. Анискина, М. А. Моцаков, И. В. Лаврова, Т. Р. Шишкина. – Навигация и гидрография. – 2023. – № 72. – С. 87–97.

Рассматриваются изменения коэффициента линейного тренда приземной температуры воздуха по Арктической зоне Российской Федерации, и устанавливается его связь с составляющими общей циркуляции атмосферы за три десятилетия. Выявлено общее повышение температуры в исследуемом регионе и его связь с изменением циркуляции в зимний период.

Ключевые слова: Арктика, температура, тренд, составляющие циркуляции, индексы циркуляции.

УДК 551.583

Результаты современных исследований климатических изменений, влияющих на морскую деятельность. С. И. Мастрюков, В. Ю. Бахмутов. – Навигация и гидрография. – 2023. – № 72. – С. 98–109.

В настоящем обзоре обобщены основные результаты современных, преимущественно зарубежных, исследований, климатических изменений, потенциально опасных для морской деятельности. Результаты этих исследований широко используются за рубежом при оценке климатических рисков и планировании мер по смягчению последствий от изменений климата в разных сферах человеческой деятельности.

Ключевые слова: изменение климата, научные исследования, климатический риск, численное моделирование, Межправительственная группа экспертов по изменению климата.

УДК 551.501.74

Метод оценивания характеристик облачности в неосвещенных в метеорологическом отношении физико-географических районах. А. А. Борисов, А. Б. Маков. – Навигация и гидрография. – 2023. – № 72. – С. 110–116.

На основе выявленной статистической зависимости между количеством, высотой нижней границы облаков и характеристиками полей давления и ветра предложен метод, позволяющий оценить характеристики полей облачности в районах, неосвещенных в метеорологическом отношении.

Ключевые слова: характеристики облачности, диагностика полей метеорологических величин, неосвещенные в метеорологическом отношении районы.

ABSTRACTS

Global Trends in the Development of Marine Differential Subsystems in the Last Decade. D. F. Milyakov. – Navigation and hydrography. – 2023. – No. 72. – P. 7–11.

Based on the results of the analysis of the bulletins of the International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, the world trends of changes in the development of marine differential subsystems are considered.

Keywords: Marine differential subsystems, control and correction stations, marine transport, differential service, GNSS, GLONASS, GPS.

Modern Methods of Identification of Models of Navigation Safety Areas. S. N. Nekrasov. – Navigation and hydrography. – 2023. – No. 72. – P. 12–23.

An overview of methods for estimating vessel divergence distances based on expert methods, methods of intelligent analysis based on random forests and methods based on the prediction of the mutual position of ships and the representation of the vessel in the form of an area characterizing the quality of management and the influence of natural marine conditions is given.

Keywords: Navigation safety areas , expert methods for estimating vessel divergence distances, intelligent multidimensional a posteriori analysis of vessel divergence distances, random forests, navigation risks.

Achievements of Nuclear Physics in the Light of Solving the Problem of Determining the Location of a Moving Object Using RelativistiC Particles. A. P. Stepanov. – Navigation and hydrography. – 2023. – No. 72. – P. 24–57.

The achievements of nuclear physics and related applied fields of science and technology are considered in the light of the possibility of their application to increase noise immunity, accuracy and autonomy of determining and clarifying the location of mobile objects. Data on existing developments and their application are provided. The probable prospects for the development of this direction are considered.

Keywords: Inertial navigation, neutrino, muon, accelerator, muonography.

The Main Results of Hydrographic Research on the Substantiation of the Outer Boundary of the Continental Shelf of the Russian Federation in the Period 1998-2023. V. Yu. Bakhmutov, E. A. Gordeeva, E. V. Kolobov, A. V. Kostenich, K. G. Stavrov. – Navigation and hydrography. – 2023. – No. 72. – P. 58–63.

The main results of hydrographic research carried out under the guidance and with the participation of scientists and specialists of the State Research Navigation and Hydrographic Institute in the interests of substantiating the outer boundary of the continental shelf of Russia in the Arctic over the past 25 years are described.

Keywords: Continental shelf boundary, marine researches, Arctic Ocean, bathymetric chart.

Influence of Ocean Surface Temperature on the Formation of Tropical Cyclones in the Northwestern Pacific Ocean. I. V. Lavrova, O. N. Toptunova, T. R. Shishkina, E. G. Alekseeva, Yu. V. Efimova. – Navigation and hydrography. – 2023. – No. 72. – P. 64–75.

Ocean surface temperature (OST) is one of the main factors influencing the formation and development of tropical cyclones. It is known that tropical cyclones form at OST above 26°. In this paper, it is shown that at the time of the occurrence of cyclones, there is also an upper limit of the water temperature on the surface – 31 °. In such cases, another factor begins to work, higher pressure fields are noted, and the formation of cyclones does not occur. Over the past 50 years, in the northwestern Pacific Ocean in the area of the formation of tropical cyclones, there has been an increase in OST in all seasons by 0.15-0.16 °/10 years. If we assume that the trend will continue

in the future, then we can expect that in the summer period tropical cyclones will form much less frequently, with less intensity and duration.

Keywords: Tropical cyclones, typhoons, ocean surface temperature, atmospheric pressure, North Pacific anticyclone, Northwest Pacific Ocean.

Methodological Approach to Substantiating the Decision on the Scattering of Supercooled Layered Clouds of the Lower Tier Based on Ground-Based Measurements. A. P. Doronin, N. A. Kozlova, V. M. Petrochenko, G. G. Shchukin. – Navigation and hydrography. – 2023. – No. 72. – P. 76–86.

The article presents the results of research on the development of a methodological approach to substantiating the decision on the scattering of supercooled undulating clouds of the lower tier based on ground-based measurements.

Keywords: low clouds, measurements, atmospheric sounding, meteorological conditions.

Variability of Surface Air Temperature in the Arctic Territory of Russia And its Relation to Changes in Atmospheric Circulation. O. N. Toptunova, I. A. Ivanova, O. G. Aniskina, M. A. Motsakov, I. V. Lavrova, T. R. Shishkina. – Navigation and hydrography. – 2023. – No. 72 – P. 87–97.

Changes in the coefficient of linear trend of surface air temperature in the Arctic zone of the Russian Federation are considered. Its connection with the components of the general circulation of the atmosphere over three decades is established. A general increase in temperature in the studied region and its connection with changes in circulation in winter were revealed.

Keywords: Arctic, temperature, trend, components of circulation, circulation indices.

Results of Modern Research of Climate Change Affecting Marine Activities. S. I. Mastryukov, V. Yu. Bakhmutov. – Navigation and hydrography. – 2023. – No. 72. – P. 98–109.

This review summarizes the main results of modern, mainly foreign, research on climate change, potentially dangerous for marine activities. The results of these research are widely used abroad in assessing climate risks and planning measures to mitigate the effects of climate change in various spheres of human activity.

Keywords: Climate change, scientific research, climate risk, numerical modeling, Intergovernmental Panel on Climate Change.

Method of Estimation of Cloud Cover Characteristics in Meteorologically Unlit Physical and Geographical Areas. A. A. Borisov, A. B. Makov. – Navigation and hydrography. – 2023. – No. 72. – P. 110–116.

Based on the revealed statistical relationship between the number, height of the lower boundary of clouds and the characteristics of pressure and wind fields, a method is proposed that allows us to evaluate the characteristics of cloud fields in areas that are not illuminated in meteorological terms.

Keywords: Characteristics of clouds, diagnostics of fields of meteorological quantities, areas that are not illuminated in meteorological terms.

ИНФОРМАЦИЯ

Глубокоуважаемые коллеги!

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

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

Журнал выходит четыре раза в год и в соответствии с Федеральным законом от 29.12.1994 № 77-ФЗ «Об обязательном экземпляре документов» поступает в Российскую книжную палату, крупнейшие библиотеки России и центры научно-технической информации.

Электронные версии выпусков журнала размещаются на сайте Российской государственной библиотеки.

Полный архив журнала в формате PDF доступен на сайте АО «ГНИНГИ» www.gningi.ru.

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 без аннотации и списка литературы – от 15 до 30 тыс. печатных знаков, включая пробелы.

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 на русском и английском языках.*

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 ее содержания.

В сведениях об авторах указываются: фамилия, имя, отчество; ученая степень; ученое звание; место работы с указанием полного наименование учреждения и должности; адрес электронной почты.

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 следует использовать встроенный в пакет *MSOffice* редактор формул.

Кириллица, греческие буквы, скобки и цифры всегда набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набираются *курсивом* как в формулах, так и в тексте, кроме устойчивых форм (max, min, cos, sin, tg, log и пр.)

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.

Адрес редакции: АО «ГНИНГИ»,
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, 41
Телефон: +7(905)228-17-51
E-mail: info@gningi.ru

ДЛЯ ЗАМЕТОК

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ, 2023, № 72

Главный редактор В. М. Смолин

Научный редактор П. И. Малеев

Редактор И. Ю. Бугрова

Технический редактор С. А. Солодухина

Учредитель – АО «ГНИНГИ». 199106, г. Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 41
Телефон: +7(905)228-17-51;e-mail: mail@gningi.ru; www.gningi.ru

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 ученой степени доктора наук».

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

Электронная версия журнала размещена на сайте www.gningi.ru

Цена свободная

Подписано в печать 22.09.2023 г. Формат 84×108/16
Печать цифровая. Усл. печ. л. 13,65. Тираж 100 экз. Заказ № 159
Отпечатано 29.09.2023 г. в типографии ООО «Цифрофсет»,
199178, г. Санкт-Петербург, 5-я линия В. О., дом 70, литер А, помещение 52/52Н

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

ISSN 2220-0983 “Навигация и гидрография”, 2023, № 72, 1 - 128

АО “ГНИНГИ”
2023