

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФИЛИАЛ
ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОКЕАН И АТМОСФЕРА В ИССЛЕДОВАНИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИХ ОКЕАНОЛОГОВ

**К 60-ЛЕТИЮ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ФИЛИАЛА
ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

*Под редакцией
члена-корреспондента РАН А.А. Родионова*

ИЗДАТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ЭКОНОМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2025

*Рекомендовано к изданию федеральным государственным бюджетным учреждением
«Санкт-Петербургское отделение Российской академии наук»*

УДК 551.46; 908
ББК 26.221
О50

О50 **Океан** и атмосфера в исследованиях Санкт-петербургских океанологов. К 60-летию Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук / под ред. чл.-корр. РАН А.А. Родионова. – СПб. : Изд-во СПбГЭУ, 2025. – 133 с.

ISBN 978-5-7310-6796-6

В коллективной монографии представлены основные результаты научной деятельности сотрудников Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН за 2021–2025 гг. в таких областях, как динамика океана, океанические биогеохимические процессы, оптика океана и атмосферы, геофизические пограничные слои, прикладные задачи гидрофизики и физическое моделирование волновихревых процессов в морской среде. Отдельная глава посвящена экспедиционным исследованиям. Представлен исторический экскурс в связи с трехсотлетием здания, в котором располагается Филиал. По традиции издание дополнено творческими работами сотрудников.

Рассчитано на ученых-океанологов, аспирантов, студентов и широкий круг читателей.

УДК 551.46; 908
ББК 26.221

*Издано при финансовой поддержке федерального государственного бюджетного учреждения
«Санкт-Петербургское отделение Российской академии наук».*

Коллектив авторов:

чл.-корр. РАН А.А. Родионов, д.т.н. А.А. Лобанов, д.ф.-м.н. Б.А. Каган,
д.ф.-м.н. Д.В. Чаликов, Н.Е. Вольцингер, к.г.н. Д.А. Романенков, к.ф.-м.н. Е.В. Софьина,
д.ф.-м.н. В.А. Рябченко, к.ф.-м.н. А.Ю. Дворников, к.г.н. Т.И. Малова,
к.ф.-м.н. В.А. Глухов, к.ф.-м.н. А.Я. Гольмиток, д.г.н. А.В. Зимин, к.т.н. Р.Е. Ванкевич,
к.т.н. С.А. Мальков, К.Б. Филин, к.т.н. Д.А. Никитин, Н.Ф. Калашиников

Рецензенты:

академик РАН В.Г. Бондур; академик РАН Г.И. Долгих

ISBN 978-5-7310-6796-6

© Санкт-Петербургский филиал Института океанологии
им. П.П. Ширшова РАН, 2025
© Издательство СПбГЭУ, 2025

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемая книга — третья в череде юбилейных монографий, посвященных деятельности Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Предыдущие две были приурочены, соответственно, к 50-летию и 55-летию Филиала [1, 2]. За период, прошедший с момента издания последней монографии, научные исследования сотрудников Филиала осуществлялись в рамках тем государственного задания: «Волновые процессы, явления переноса и биогеохимические циклы в морях и океанах: исследование формирующих механизмов на основе физико-математического моделирования и натуральных экспериментальных работ» (№ FMWE-2021–0014), «Явления переноса, вихревые и волновые процессы, биогеохимические циклы и геофизические пограничные слои в Мировом океане: физико-математическое моделирование и экспериментальные исследования структурных и энергетических характеристик» (№ FMWE-2024–0028), «Гидрофизические исследования волновихревых и гидроакустических процессов в крупномасштабных лабораторных бассейнах» (№ FMWE-2024–0029). Открытие последней из перечисленных тем стало результатом многолетних усилий администрации и сотрудников Лабораторно-испытательного комплекса Санкт-Петербургского филиала по созданию и вводу в эксплуатацию Уникальной научной установки, состоящей из трех экспериментальных бассейнов, аналогов которому в России на данный момент нет.

На период 2021–2025 гг. приходится также и **структурное преобразование Филиала**. Помимо четырех лабораторий: Численных экспериментов по динамике океана (заведующий — к. г. н. Д. А. Романенков), Моделирования океанских биогеохимических циклов (заведующий — к. ф.-м. н. А. Ю. Дворников), Оптики океана и атмосферы (до сентября 2024 г. заведующий — к. ф.-м. н. М. А. Родионов, с сентября 2024 г. — к. ф.-м. н. В. А. Глухов), Геофизических пограничных слоев (заведующий — д. г. н. доцент А. В. Зимин) и Лабораторно-испытательного комплекса (начальник — К. Б. Филин), в составе Филиала на основе внебюджетной группы гидрофизических исследований был создан Центр прикладных гидрофизических исследований (начальник — к. т. н. С. А. Мальков).

В 2024 г. Анатолию Александровичу Родионову исполнилось семьдесят лет. По закону завершился контракт на должность директора Филиала, которую он занимал с 2009 г. По согласованию с РАН А. А. Родионов (с 2022 г. — член-корреспондент РАН) занял должность **руководителя научного направления «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» ИО РАН**. На должность директора Филиала с должности заместителя директора был назначен Андрей

Александрович Лобанов, доктор технических наук. До прихода в Филиал на основное место работы в апреле 2023 г. с должности заместителя начальника Научно-исследовательского управления общесистемных проблем морской деятельности Российской Федерации Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института в течение шести лет он являлся внешним совместителем в Филиале при выполнении внебюджетных НИР.

Знаковым событием за прошедшие пять лет стало образование в 2024 г. **Санкт-Петербургского отделения РАН**. Юридически Филиал как структурное подразделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН не может находиться под научно-методическим руководством Отделения. Однако же и активное участие в деятельности президиума СПбО РАН А. А. Родионова, организация при СПбО РАН Совета по естественным наукам, в который входит Секция наук о Земле, и организуемые совместно с СПбО РАН научные мероприятия — все это позволяет плодотворно сотрудничать с научными организациями региона в целях повышения потенциала научного сообщества Санкт-Петербурга, роли науки в процветании России и Санкт-Петербурга.

В течение рассматриваемых пяти лет сотрудниками Филиала были защищены **пять диссертаций**: три — на соискание ученой степени кандидата географических наук (Т. И. Малова — «Рестаурация данных об исторических наводнениях Невы: принципы построения репрезентативного каталога», А. А. Коник — «Изменчивость характеристик крупномасштабных фронтальных зон в Баренцевом и Карском морях в XXI веке», Е. И. Свергун — «Короткопериодные внутренние волны в шельфовых областях с выраженной приливной динамикой на примере Баренцева моря и Курило-Камчатского региона Тихого океана») и две — на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (В. А. Глухов — «Закономерности формирования сигналов обратного рассеяния при лидарном зондировании приповерхностных слоев морской воды и дна», К. В. Фокина — «Фазо-разрешающее моделирование трехмерных ветровых волн»).

Активно продолжается работа по проведению ставших традиционными и организации новых **конференций**. В 2021, 2023 и 2025 гг. были проведены Всероссийские конференции «Оптика естественных вод (ONW)» и «Крым: наука, культура, политика». В 2022 и 2024 гг. — Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА)». Общее количество участников этих мероприятий приближается к тысяче человек. В 2025 г. впервые была проведена Всероссийская конференция «Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита», которая получила высокую оценку среди участников и, по отзывам, видится традиционным научным мероприятием с периодичностью один раз в два года.

В период с 2021 по 2025 гг. Филиал провел и принял участие более чем в двадцати **экспедициях**, в ходе которых был получен большой объем натуральных данных:

- январь 2021 г. — в районе Кемской губы Белого моря;
- июнь-июль 2021 г. — в Четвертом Курильском проливе;
- июнь-июль 2021 г. — в Балтийском море;
- июль-август 2021 г. — в южной части Баренцева моря;
- июль-август 2021 г. — в Баренцевом море;
- май 2022 г. — на Ладожском озере;
- июнь — 2022 г. — на Онежском озере;
- июль-август 2022 г. — в западной части Баренцева моря;
- сентябрь 2022 г. — в Карском и Баренцевом морях;
- март 2023 г. — в Белом море;
- апрель-май 2023 г. — в Баренцевом море;
- июнь 2023 г. — в Онежской губе Белого моря;
- июнь-2023 г. — на Онежском озере;
- июль-август 2023 г. — на шельфе и континентальном склоне морей Российской Арктики;
- апрель 2024 г. — в Авачинском заливе;
- июль-август 2024 г. — на шельфе и континентальном склоне морей Российской Арктики;
- август-сентябрь 2024 г. — в дальневосточных морях;
- май-июнь 2025 г. — в Черном море;
- июль-август 2025 г. — в дальневосточных морях.

Важной вехой истории Филиала стало создание в 2025 г. виртуального портала **«Бессмертный полк»**, приуроченного к восьмидесятилетию Победы в Великой Отечественной войне и размещенного на сайте Филиала. Многие сотрудники откликнулись на призыв сообщить сведения о своих родственниках, участвовавших в Великой Отечественной войне. Результатом стала уникальная информационно-биографическая подборка, которая является вкладом Филиала в сохранение священной народной памяти.

В период с 2021 по 2025 гг. сотрудниками Филиала были получены **государственные и ведомственные награды**:

2021 г.

Каган Борис Абрамович — Медаль «За безупречный труд и отличие» III степени (приказ Минобрнауки РФ № 1056-к/н от 17.09.2021).

Родионов Анатолий Александрович: Орден Александра Невского (указ Президента РФ № 142 от 15.03.2021); Премия Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся научные результаты в области науки и техники в 2021 году в номинации «география, науки об атмосфере и гидросфере — премия

им. М. И. Будыко» за заслуги в области гидрофизики океана и фундаментальных проблем гидродинамики (Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 25.05.2021 № 328 «О присуждении премий Правительства Санкт-Петербурга за выдающиеся научные результаты в области науки и техники в 2021 году»); Почетная грамота Комитета по науке и высшей школе (приказ КНВШ № 86-к от 19.03.2021); Почетная грамота РАН (распоряжение РАН № 10105–236 от 23.03.2021).

Рябченко Владимир Алексеевич — «Почетный работник науки и высоких технологий Российской Федерации» (приказ Минобрнауки № 242 к/н от 19.04.2021).

Романенков Дмитрий Анатольевич — Почетная грамота Минобрнауки (приказ Минобрнауки № 242-к/н от 19.04.2021).

Вольцингер Наум Евсеевич — Благодарность Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга (приказ КНВШ № 85-к от 19.03.2021).

Монахов Роман Юрьевич — Благодарность Комитета по науке и высшей школе СПб (приказ КНВШ № 85-к от 19.03.2021).

В честь 55-летия СПбФ ИО РАН коллектив награжден почетной грамотой Российской академии наук (распоряжение ФГБУ «Российская Академия Наук» от 23 марта 2021 г. № 10105–235 «О награждении Почетной грамотой Российской академии наук»).

2024 г.

Родионов Анатолий Александрович — Благодарность Президента Российской Федерации.

Шпилев Николай Николаевич — нагрудный знак «Молодой ученый» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации за личные заслуги и высокие результаты в сфере научно-технической деятельности.

Вольцингер Наум Евсеевич — Почетная грамота Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга.

Благодарность Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга: *Малова Татьяна Игоревна, Чаликов Дмитрий Викторович*.

Юбилейная медаль «300 лет Российской академии наук»: академик РАН Владислав Александрович Румянцев, член-корреспондент РАН *Анатолий Александрович Родионов*, член-корреспондент РАН *Николай Николаевич Филатов*; *Дмитрий Викторович Чаликов, Борис Абрамович Каган, Наум Евсеевич Вольцингер*.

Румянцев Владислав Александрович — Премия Санкт-Петербургского отделения Российской академии наук им. К. Я. Кондратьева за выдающиеся

научные и научно-технические достижения в области наук о Земле за цикл научных работ по единой тематике «Исследование северных водных объектов, создание научно-методологических и технологических основ системы контроля за их экологической безопасностью в условиях крупномасштабного хозяйственного освоения Арктической зоны и методов борьбы с опасными экологическими проявлениями».

2025 г.

Зимин Алексей Вадимович — Грамота Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга.

Благодарность Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга: *Софьина Екатерина Владимировна, Ванкевич Роман Евгеньевич, Исаев Алексей Владимирович, Мартьянов Станислав Дмитриевич.*

Филатов Николай Николаевич — Премия Санкт-Петербургского отделения Российской академии наук им. К. Я. Кондратьева за выдающиеся научные и научно-технические достижения в области наук о Земле за цикл работ по единой тематике «Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем континентальных водоемов России».

ДИНАМИКА ОКЕАНА

Лаборатория численных экспериментов по динамике океана создана в 1973 г. В настоящее время состав лаборатории включает следующих сотрудников: кандидат географических наук Д. А. Романенков (руководитель), доктор физико-математических наук, профессор Б. А. Каган, доктор физико-математических наук, профессор Д. В. Чаликов, кандидат физико-математических наук Е. В. Софьина, кандидат физико-математических наук Д. В. Сеин, кандидат физико-математических наук К. Ю. Булгаков, научные сотрудники Н. Е. Вольцингер и А. А. Тимофеев.

Основные направления исследований Лаборатории за период 2021–2025 гг.:

- Развитие технологии прямого моделирования ветровых волн и исследование физики морских волн.
- Моделирование поверхностных и внутренних приливов в морях Российской Арктики и Курило-Камчатских водах Тихого океана, включая исследование приливных изменений регионального климата морских акваторий.
- Развитие гибридных моделей негидростатической гидродинамики течений в акваториях со сложным рельефом дна.

Основные достижения

Усовершенствована численная модель морских поверхностных волн с учетом процессов притока и диссипации энергии для расчета статистических характеристик развивающегося ветрового волнения и совместного спектрального и фазо-разрешающего моделирования ветровых волн (руководитель работ — д. ф.-м. н., профессор Д. В. Чаликов).

Общая проблематика и описание модели. Предметом продолжающихся работ является описание технологии моделирования реального волнового поля как ансамбля большого числа волн реальной формы и различных размеров и обсуждение современного состояния проблемы параметризации физических процессов. Основным ограничением общности моделей является предположение о потенциальности волновой динамики. Причина такого упрощения в том, что без такого предположения мы получаем весь букет проблем, связанных с турбулентностью. Реальные волны развиваются в среде со сдвигами скорости, они порождают турбулентность, взаимо-

действуют с турбулентностью и частично диссипируют за ее счет. Формулировка и построение такой численной модели не представляет особых трудностей. Однако такая модель принципиально непригодна для долгосрочного моделирования многомодового волнового поля, поскольку неизбежные неточности в схемах параметризации турбулентности в конечном итоге затмевают естественную, очень медленную эволюцию волн из-за относительно слабых эффектов нелинейных взаимодействий, а также притока энергии и диссипации.

Новая модель TriDWave основана на численном решении трехмерных уравнений Эйлера для потенциальных волн в нестационарной неортогональной системе координат. Описание модели и численной схемы можно найти в [3, 4].

Модель TriDWave предназначена для моделирования многомодового волнового поля на основе уравнений полного потенциала при условиях периодичности. Это условие предполагает, что физические процессы рассматриваются в области, размерность которой мала по сравнению с размерами бассейна. Сама область достаточно велика, чтобы вместить большой ансамбль волн разного размера. Периодичность предполагает, что волновое поле однородно, т. е. его статистические характеристики мало меняются в пространстве, но зависят от времени.

Модель TriDWave может использоваться в двух режимах. Самый простой из них — квазистационарный режим (QSM), в котором предполагается, что спектр волны не меняется в течение достаточного времени для расчета необходимых статистических характеристик. Начальным условием для таких расчетов является двумерный спектр волны возвышения, который преобразуется в двумерные сеточные поля возвышения и поверхностного потенциала на основе линейной теории. Такое представление неточно, поскольку реальные волновые поля не являются простой суперпозицией линейных мод с равномерно распределенными фазами. Известно, например, что большие волны имеют острые гребни и пологие впадины. Кроме того, реальный спектр никогда не бывает таким гладким, как дается в эмпирической аппроксимации. В нем образуются провалы и пики, которые меняются местами. Поэтому мы должны доверять модели обработке начального состояния до квазистационарного режима, в котором глобальные статистические характеристики перестают меняться со временем. В качестве таких характеристик можно использовать моменты поля возвышения различных порядков. Опыт показывает, что для полей с типичной глобальной крутизной порядка 0,1 время релаксации составляет порядка нескольких сотен периодов пиковой волны. Разумеется, длительность этого периода необходимо оценивать для каждого конкретного случая. Отметим, что воспроизведение строго статистически нестационарной ситуации нецелесообразно, поскольку происходит трансформация спектра, вызванная нелинейными взаимодействиями и вызывающая медленное смещение спектра волн в сторону малых волновых чисел

(downshifting). Необходимо ввести второй источник нестационарности в виде высокочастотного фильтра, обеспечивающего устойчивость и поглощающего энергию. Для компенсации потерь энергии необходимо ввести слабый приток энергии. Таким образом, режим квазистационарности оказывается не вполне адиабатическим, что ограничивает длительность выборки для статистических расчетов. Расчет по модели в таком режиме не связан с большими затратами машинного времени. Такой подход широко используется для расчета статистических характеристик волнового поля (например, повторяемости экстремальных волн) при заданной форме спектра.

Более сложным является нестационарный режим NSM (Non-Stationary mode), в котором предполагается, что источником нестационарности является приток энергии от ветра и диссипация, т. е. физические процессы, не описываемые исходными уравнениями. Расширение модели такими алгоритмами является типичной чертой технической и геофизической гидродинамики. Например, модели прогноза погоды оснащены обширными алгоритмами, описывающими турбулентность, радиацию, облачность, осадки и многое другое. Как правило, эти алгоритмы часто основаны на эмпирической информации и по строгости значительно уступают базовым уравнениям, которые построены на хорошей математике. Физические процессы в морских волнах несколько проще, чем, например, в атмосфере, но им уделено гораздо меньше внимания. Поэтому состояние проблемы параметризации притока и диссипации энергии в волнах пока неудовлетворительное. В целом, эти процессы намного сложнее всей теории адиабатических нелинейных волн.

Взаимодействие ветра и волн. Энергия и импульс передаются из воздуха в воду полем поверхностного давления и касательным напряжением. Касательное напряжение не может быть усвоено в потенциальной волновой модели. Даже в не потенциальной волновой модели поток энергии к волнам через касательное напряжение очень мал, так как локальное напряжение слабо коррелирует с поверхностными орбитальными скоростями. Следовательно, такой импульс передается не волнам, а поверхностным течениям. При рассмотрении формирования касательного напряжения необходимо учитывать его спектральные свойства. Если разрешение спектра волны очень высокое, можно предположить, что импульс передается через молекулярную вязкость при очень больших локальных градиентах касательной составляющей скорости. Расчеты с использованием модели, проведенные в [5], показывают, что для набора линейных волн малой амплитуды инициированное поверхностное давление действительно подчиняется теории Майлса. Метод особенно точен для монохроматических волн. Предполагается, что с ростом амплитуд теория из детерминированной превращается в стохастическую, в том смысле, что инициированное давление флуктуирует во времени и становится достоверным после усреднения. В целом, сейчас нельзя сказать, что проблема роста волн под воздействием ветра в настоящее время изучена удовлетворительно.

Диссипация энергии. Существует несколько механизмов диссипации энергии волн, наиболее очевидным из которых является обрушение. Оно всегда происходит как разделение некоторого вращающегося объема воды, сопровождающееся образованием пены и брызг. Поскольку при этом происходит перемешивание воды и воздуха, теоретическая формулировка процесса не может быть основана на классической гидродинамике и требует более сложного и, следовательно, менее точного подхода. Крайне маловероятно, что такой подход может привести к простым и надежным схемам параметризации диссипации волн. Основная задача параметризации опрокидывания волн — не допустить возникновения ситуации, когда дальнейший расчет невозможен, например, при появлении интервалов с неединичным значением поверхности. Подобная ситуация может возникнуть на любой стадии развития волны на разных волновых числах. Для устойчивого расчета необходимо ввести сглаживание поверхности с учетом контроля преобразования энергии и сохранения массы. В общем случае необходимость в таких действиях возникает во многих разделах вычислительной гидродинамики. Например, LES-моделирование использует нелинейную вязкость для предотвращения неустойчивости. Параметризация обрушения волн может быть основана на локальном высокоселективном операторе диффузии с подходящим коэффициентом диффузии. Такой алгоритм не изменяет объем и уменьшает кинетическую и потенциальную энергию волн. Предполагается, что потерянный импульс передается горизонтальному потоку, а энергия частично передается турбулентности и течению. Кроме того, энергия и импульс могут передаваться другим волновым режимам. Выбор параметров в схеме основан на простых рассуждениях: волны должны максимально приблизиться к обрушению, но не обрушаться и подвергаться сглаживанию. Реализация алгоритмов притока и диссипации энергии позволяет моделировать развитие волн при многократном превышении начальной энергии.

Примеры расчетов на модели TriDWave. Число мод, используемых для аппроксимации спектров, было равно (513×257) , число узлов сетки — (1024×512) , число вертикальных уровней — 20. Начальные условия рассчитывались на основе эмпирического спектра JONSWAP [6] с максимумом при волновом числе $k_p = 50$ (волновое число нормировано на L^{-1} , где L — характерный масштаб длины в метрах) и очень узким углом расширения, моделирующим начальную стадию развития волн. При этом считалось, что скорость ветра $U = 5c_p$ (c_p — фазовая скорость волн в спектральном пике, которая нормирована на масштаб L/T , где $T = \sqrt{L/g}$ — масштаб времени, g — ускорение свободного падения) остается постоянной на всем периоде интегрирования. Расчеты проводились с шагом по времени $\Delta\tau = 0.01$ с числом временных шагов 200000 (здесь и далее время нормировано на T). Поскольку скорость ветра существенно превышала фазовую скорость волн, энергия волн и их размеры росли. Эволюция интегральных характеристик решения представлена на рис. 1.1.

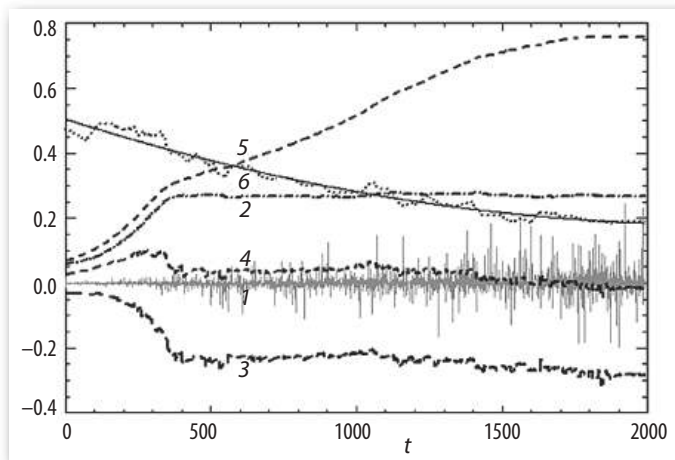


Рис. 1.1. Эволюция интегральных характеристик решения:
 1 — скорость нелинейных взаимодействий N ;
 2 — скорость поступления энергии от ветра I ; 3 — скорость диссипации энергии D ; 4 — полный баланс энергии ($I + D$); 5 — эволюция полной энергии E ; 6 — эволюция волнового числа пика спектра $0.01k_p$.
 По оси абсцисс отложено безразмерное время, по оси ординат — безразмерные значения характеристик $N, I, D, I + D, E$, нормированные на масштаб L^2/T^3 . Характеристика N увеличена в 10^9 раз, E — в 10^5 раз, остальные (кроме k_p) — в 10^7 раз

Интегральный эффект нелинейных взаимодействий волн N (т. е. скорость изменения полной энергии, равной сумме потенциальной и кинетической энергий, серая флуктуирующая кривая) в адиабатическом варианте модели теоретически должен быть равен нулю. Конечно, разностный аналог уравнений не обеспечивает этого свойства: на каждом временном шаге возникает ошибка, которая на два десятичных порядка меньше интегральных притоков и рассеивания энергии. Важно, что эта ошибка не коррелирована во времени и, будучи усредненной за короткий промежуток времени, быстро стремится к нулю. Приток энергии от ветра (кривая 2) быстро растет до времени $\tau = 400$ и после этого остается на одном уровне. Большая часть энергии, поступающей от ветра, рассеивается (кривая 3), но баланс энергии (кривая 4) сохраняется положительным во времени, что выражается в росте полной энергии (равной сумме потенциальной и кинетической энергии, кривая 5). Пунктирная кривая 6 и сглаженная тонкая кривая показывают сдвиг волнового числа спектрального k_p (так называемый «downshifting»).

Примеры спектра волн на разных стадиях развития показаны на рис. 1.2 в полярных координатах (углы показаны как лучи, а модуль волнового числа находится на горизонтальной оси). Для наглядности спектры нормированы максимальным значением на последней панели. Как видно, характерные значения спектра увеличиваются на порядок по мере развития, а пик спектра смещается от волнового числа $k_p = 50$ к $k_p = 20$.

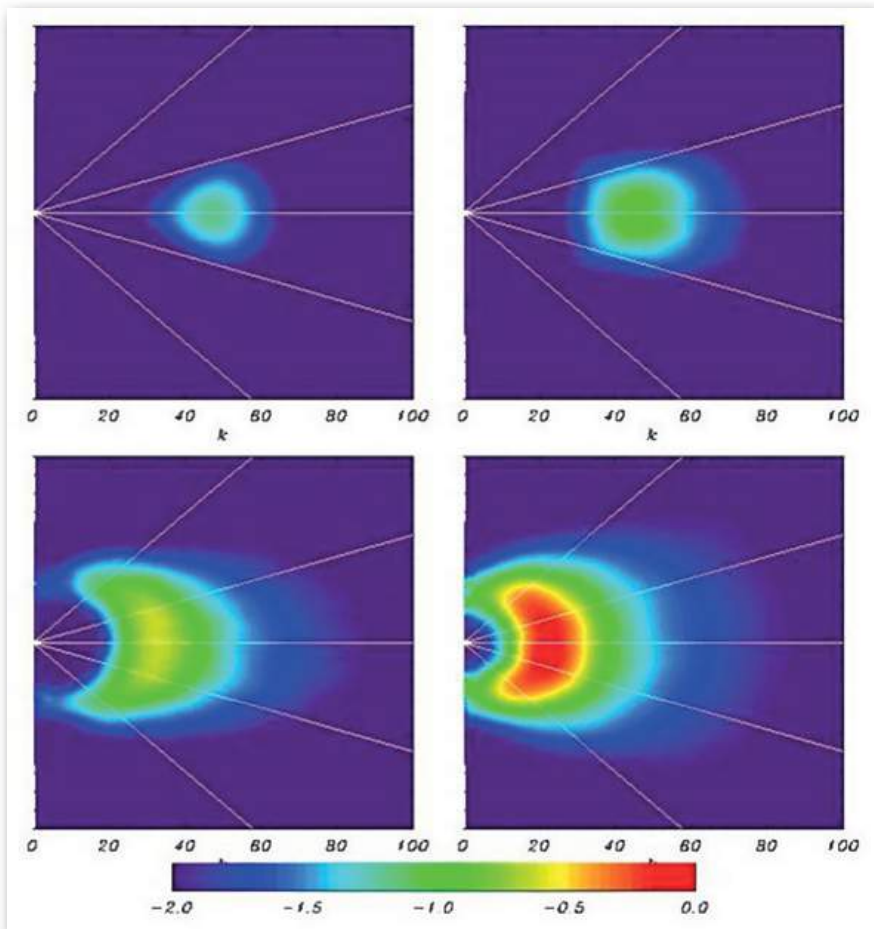


Рис. 1.2. Двумерные спектры, усредненные по четырем временным интервалам (0÷10), (10÷300), (300÷1000), (1000÷2000) и нормированные на максимальное значение спектра S_m за последний период, в полярных координатах $S(\varphi, k)$, φ — направление мод (лучи), k — модуль волнового числа (горизонтальная ось). Легенда определяет значения $S_j = \log_{10}(S/S_m)$. Темно-синий фон соответствует $S_j \leq -2$. Исходные спектры нормированы на L^{-2}



Рис. 1.3. Изображение генерируемой моделью мгновенного волнового поля (фрагмент), показанное с небольшой высоты в направлении движения волны

Вид волновой поверхности с небольшой высоты показан на рис. 1.3. Общее направление волн — от наблюдателя. Как видно, поверхность состоит из множества волн разных размеров и форм. Последовательность таких изображений, представленных в виде фильма, дает поразительно достоверную картину реального волнового поля. Двумерные поля, генерируемые полной моделью, обладают всеми свойствами реальных волн: вертикальной асимметрией (высокие гребни и сглаженные подошвы), горизонтальной асимметрией (наклон на переднем фронте волны значительно больше, чем на заднем), реальным распределением повторяемости для первых четырех моментов поля возвышения.

Экстремальные волны. Одним из популярных приложений прямых математических волновых моделей является изучение так называемых «freaks» («уродов»), т. е. аномально больших волн. Это явление долгое время считалось необычным, по-видимому, потому, что океан огромен, а количество волн в нем очень велико. Прямые встречи с такой волной были сравнительно редки (не говоря уже о том, что документально хорошо было зафиксировано не очень много таких случаев).

Механика возникновения экстремальных волн интересна с точки зрения классической механики жидкости. Однако, появление высоких волн не более удивительно, чем появление людей ростом более двух метров. Вообще, редкие явления происходят в природе гораздо чаще, чем предсказывает классическая статистика. Например, с точки зрения элементарной теории вероятностей, ветер никогда не достигает скорости 100 м/с, однако такие невероятные события были зафиксированы.

Математики взялись за объяснение природы экстремальных волн. Наибольшую популярность получила так называемая «Теория модуляционной неустойчивости», которая берет свое начало в [7], где теоретически и экспериментально показано, что волны Стокса неустойчивы при наличии малых возмущений. Этот эффект был назван «BF неустойчивостью» (Benjamin-Feir instability). Численное воспроизведение этого явления было проведено в [8]. Было показано, что при плотной упаковке стоковых мод (т. е. их расположении на волновых числах 1, 2, 3...) со стоковой волной ничего не происходит. Если моды Стокса разнесены, т. е. лежат на волновых числах $(n, 2n, 3n, \dots, n$ — целое число), промежутки между модами заполняются энергией, заимствованной у окружающих мод. Таким образом, волны Стокса, так же, как и линейные волны, действительно неустойчивы, что

приводит к гомогенизации спектра. Было проведено множество численных экспериментов, и ни разу не было замечено, чтобы какая-либо из мод проявляла тенденцию к чрезмерному росту. Такой же результат был получен в [7]. Авторы ВФ неустойчивости называют этот процесс «распадом», вероятно, имея в виду, что он не несет никаких созидательных функций. Тем не менее, рост отдельных мод предсказывался во многих исследованиях, апеллирующих к теории ВФ, хотя и с использованием упрощенных подходов. Экстремальные волны систематически (и не так уж редко) возникают в полях, генерируемых полными нелинейными уравнениями [9].

Как показал более тщательный анализ наблюдений, экстремальные волны не так уж редки в природе. Конечно, статистика экстремальных волн зависит от их определения. Наиболее удачным определением экстремальной волны можно считать волну, высота которой в два раза превышает характерную высоту волны, определяемую как высоту одной трети самых высоких волн. Таким образом, если характерная высота волны составляет полметра, то волны, превышающие один метр, можно отнести к экстремальным волнам. Это, конечно, шутка, за которой, однако, скрывается глубокий смысл. Глубоким свойством волнового поля является его так называемое самоподобие, которое можно определить как универсальность соответствующим образом нормированных статистических характеристик. Если в предыдущем примере слабых волн из серии в десять тысяч волн высота примерно десяти волн превысит один метр, то с большой долей вероятности можно утверждать, что и в сильных волнах с характерной высотой волны 5 м, аналогичные расчеты покажут, что среднее число волн, превышающих 10 м, будет примерно таким же. Достоверность такого утверждения возрастает с увеличением объема выборки (т. е. числа зарегистрированных волн). Из этого следует простой вывод, хорошо известный морякам: чем сильнее шторм, тем больше вероятность встречи с опасно высокой волной. Отдельные события могут резко отличаться от среднестатистического, и нет никакой гарантии, что судно обязательно встретит (или не встретит) опасную волну или их серию. Поэтому обоснованный прогноз появления опасных волн может звучать примерно так: «в определенном районе океана в определенный промежуток времени вероятность появления волны высотой 10–12 м составляет 10^{-6} – 10^{-5} », что можно трактовать, как «одна из миллиона или из десяти тысяч больших волн». Прогноз можно сформулировать как указание на временной интервал ожидания такой волны. Учитывая огромность океана и большое количество судов, одновременно в нем находящихся, появление экстремальных волн можно скорее рассматривать как закономерность, чем уникальное событие. Если встреча с волной не сопровождалась аварией, моряки, скорее, склонны не придавать этому значения.

Полезность прогноза, пример которого дан выше, может оказаться спорной. Такой прогноз никогда не может быть точным и носит, скорее, характер предупреждения. Тем не менее, если судно, например, перегружено палубными контейнерами и есть опасность, что оно окажется лагом к большим

волнам, капитан может принять решение избежать попадания судна в опасный район за счет известного перерасхода горючего.

В печати описывались иногда случаи появления аномальных волн при отсутствии сильного волнения. Разумеется, такие публикации надо отнести к фальсификации. Волна должна иметь источники энергии в окружении. Вероятностный прогноз экстремальных волн, пример которого дан выше, может быть дан только в том случае, если используемая волновая прогностическая модель достаточно хорошо описывает скорость накопления энергии, получаемой от ветра и затраты энергии на диссипацию. По-видимому, наиболее продвинутой прогностической глобальной моделью волн является модель WAVEWATCH [10]. Решающее значение имеет также качество прогноза скорости ветра.

Рекомендации к практическому применению. Выше были изложены общие принципы подхода к моделированию реальных волн в открытом океане. Поскольку модель описывает индивидуальное движение многих тысяч волн разного размера, то для воспроизведения волнового режима в конкретном водоеме она заведомо непригодна. Поэтому основное назначение модели — исследование статистического режима волновых полей для различных спектральных распределений энергии. Еще более важным применением модели является разработка параметризации физических процессов в волнах, связанных с преобразованием энергии. Численное моделирование волн имеет очевидные преимущества перед экспериментальными исследованиями, особенно в аэродинамических каналах, где ускорение резко ограничено и возникает множество других помех из-за малых размеров бассейнов и неточности измерений. Численные исследования практически не ограничивают содержание и объем «измеряемой» информации. Наконец, численные модели позволяют осуществлять быструю настройку различных вариантов, неограниченное повторение численных экспериментов и устраняют многие опасения относительно материальных и финансовых проблем, что существенно экономит время и повышает комфорт исследователя.

Статистические характеристики развивающегося ветрового волнения

Показана малая зависимость безразмерных статистических характеристик волнового поля от степени развития волн на основе длительных численных экспериментов по ускоренной фазо-разрешающей модели (к. ф.-м. н. К. В. Фокина, д. ф.-м. н. Д. В. Чаликов) [11].

При развитии волнового поля под действием ветра происходит измерение всех статистических характеристик волнения. Можно предположить, что эта изменчивость может оказаться значительно меньше при применении соответствующего масштабирования. Полагается, что характерная высота волны

H_s — это новый масштаб длины, нормированный на L и характеризующий уровень энергии.

В серии численных экспериментов ускоренная фазо-разрешающая модель интегрировалась с высоким разрешением 513×257 мод (2048×1024 узлов сетки). Начальные условия задавались спектром JONSWAP. Для энергонесущей части спектра было использовано симметрично направленное распределение, задавались практически одномерные волны с очень маленькими поперечными возмущениями. С увеличением скорости ветра волны начинают развиваться. Процесс воспроизводился в течение интервала 6000 безразмерных единиц времени с шагом $\Delta\tau = 0.01$. Подчеркнем, что в экспериментах воспроизводились волны с крутизной, типичной для реальных волн. Поскольку объем полученной в ходе расчетов информации слишком велик для представления, одномерные спектры были усреднены по каждому из 6 временных периодов с примерно равными приращениями полной энергии.

Были проанализированы статистические характеристики развивающегося волнения, в качестве которых рассматривается распределение вероятностей четырех статистических моментов. На рис. 1.4 показано, что после нормировки на H_s все кривые поля возвышения за разные периоды времени

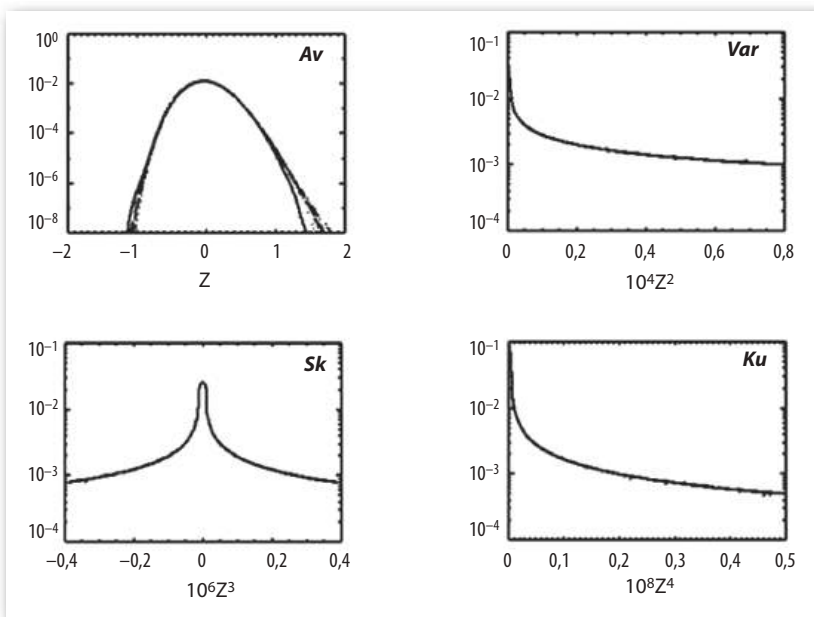


Рис. 1.4. Распределение вероятностей четырех моментов поля возвышения Z^n ($n = 1, 2, 3, 4$), $Z = \eta H_s^{-1}$ (где η — возвышение, H_s — высота значительной волны), рассчитанное по шести различным интервалам времени, каждый из которых оканчивается на время: 1 — $\tau = 500$; 2 — $\tau = 900$; 3 — $\tau = 1600$; 4 — $\tau = 2300$; 5 — $\tau = 3800$; 6 — $\tau = 6000$

накладываются друг на друга. Сплошная кривая для первого момента относится к начальному периоду, в котором нелинейные свойства волнения еще полностью не сформировались, различия остальных кривых можно считать незначительными. Для второго и более высокого порядков нормированных моментов распределение вероятностей для разных стадий развития волнения оказывается универсальным, т. е. все кривые совпадают с точностью до толщины линии на графике. Такие же выводы были получены и для распределения вероятностей поля вертикальной скорости.

Совместное спектральное и фазо-разрешающее моделирование ветровых волн

Разработана методика, объединяющая спектральную и фазо-разрешающую модели. Установлено, что для волнового поля, рассчитанного по разработанной методике, вероятность появления высоких волн и высокого эксцесса на порядок выше, чем для волнового поля, полученного в результате спектрального прогноза (д. ф.-м. н. Д. В. Чаликов, к. ф.-м. н. К. Ю. Булгаков, к. ф.-м. н. К. В. Фокина) [12].

Наиболее важным практическим достижением в области изучения ветровых волн является создание спектральных моделей для прогноза ветрового волнения. Однако спектральное описание не содержит информации о самих волнах, а лишь о распределении энергии волны по направлению и частоте в каждой точке области. Спектральная модель предполагает, что волновое поле состоит из суперпозиции линейных волн со случайными фазами. Из такого спектра невозможно извлечь сведения об экстремальных волнах и о других более тонких статистических характеристиках. Преобразованное в физическое волновое поле, оно выглядит нереальным, поскольку реальные волны обычно имеют протяженные плавные подошвы и острые пики.

Полученная по спектральным моделям информация может быть расширена путем объединения спектральной и фазо-разрешающей моделей. Фазо-разрешающие модели основаны на динамических уравнениях и включают явное воспроизведение морской поверхности и эволюции поля скоростей.

Для объединения моделей на первом этапе были получены волновые спектры по спектральной модели прогноза ветровых волн WAVEWATCH III, в которой в качестве начальных условий использовались поля скорости ветра на 10 м, поля влажности и температуры на 2 м из модели атмосферной модели WRF. Были проведены расчеты эволюции волнового спектра в Балтийском море в течение безледного периода, начиная с 1 мая по 30 ноября 2014 г.

В целях экономии вычислительных ресурсов было выбрано всего пять модельных узлов, для которых сохранялись волновые спектры. Узлы соответствуют точкам, расположенным в разных наиболее глубоких частях Балтийского моря. Полученные спектры были разделены на группы, каждая из

которых соответствовала следующим диапазонам значений характерной высоты волны: от 1 до 1,5, от 1,5 до 2, от 2 до 2,5, от 2,5 до 3, от 3 до 3,5 и от 3,5 до 4 м. В каждой группе выбирались только те поля, направление пика плотности в которых отличалось друг от друга на 30 градусов и более. Таким образом, из базы полей спектральной плотности было выбрано 49 полей.

На следующем этапе объединения моделей были сгенерированы начальные условия для фазо-разрешающей модели. Волновые спектры, рассчитанные моделью WAVEWATCH, заданы в полярных координатах, поэтому для генерации начальных условий для фазо-разрешающей модели эти спектры были интерполированы в равномерную сетку волновых чисел. При интерполяции сохранялась такая интегральная характеристика, как высота характерной волны, т. е. полная потенциальная энергия или нулевой момент поля. На рис. 1.5 представлены исходное и интерполированное поле спектральной плотности. Поле в пространстве регулярных волновых чисел визуально более растянуто в сравнении с полем в полярной системе координат, т. к. сетка в ней не равномерна по радиусу. Значения характерной высоты волны для обоих полей совпадают.

Поскольку фазо-разрешающая модель сформулирована в безразмерном виде, то следующий этап генерации начальных условий заключался в масштабировании и дискретизации волнового поля в терминах Фурье-коэффициентов для уровня и поверхностного потенциала скорости. При нормализации

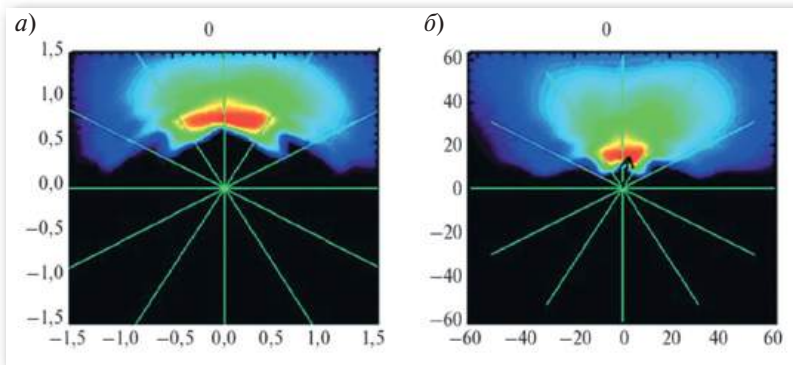


Рис. 1.5. *а* — поле спектральной плотности в полярной системе координат; *б* — поле спектральной плотности в пространстве регулярных волновых чисел. На фрагменте (*а*) по вертикальной и горизонтальной осям — безразмерные значения частоты в направлениях y и x соответственно. Частота умножена на знак фазовой скорости (поэтому 3-я и 4-я четверти имеют отрицательные значения). На фрагменте (*б*) по вертикальной и горизонтальной осям — безразмерные значения волнового числа в направлениях y и x соответственно. Красный цвет соответствует максимальному значению спектральной плотности, черный — минимальному значению

учитываются два параметра, масштаб длины L и ускорение свободного падения g . В качестве масштаба длины L принималась длина наибольшей волны, которая равна 243,7 м. Так как в спектральных моделях не воспроизводится динамика свободной поверхности, то значения поверхностного потенциала скорости воспроизводились на основе линейной теории.

Фазо-разрешающая модель далее интегрировалась во времени в течение порядка 100 периодов волны пика спектра, что достаточно для того, чтобы волновое поле приобрело нелинейные свойства. Поскольку разрешение спектральной модели довольно низкое, приходилось использовать низкое разрешение в фазо-разрешающей модели: число мод было равно 129×129 , число узлов сетки — 256×256 . Шаг по времени был равен 0,01. Для подавления неустойчивости инициировалось сглаживание на высоких волновых числах. Во избежание потери энергии был введен приток энергии от ветра, использованный в расчетах с WAVEWATCH.

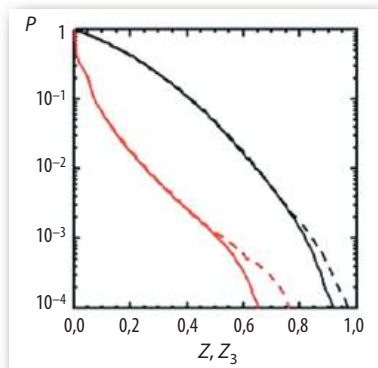


Рис. 1.6. Интегральная повторяемость P (по вертикальной оси), рассчитанная для безразмерного поля возвышения поверхности Z (где $Z = \eta H_s^{-1}$, η – возвышение, H_s – характерная высота волны) (черные кривые) и для безразмерного третьего момента поля возвышения поверхности Z_3 (где $Z_3 = \eta^3 H_s^{-1}$) (красные кривые). Сплошные кривые относятся к начальному полю, пунктирные — к концу численного интегрирования

гребней. Как можно видеть, для конечного поля (пунктирные кривые) вероятность появления высоких волн и высокого эксцесса примерно на порядок выше, чем в начальном поле (сплошные кривые), полученном по модели WW3.

Предложенный подход может значительно расширить возможности спектральных моделей и повысить качество прогноза ветрового волнения.

Предложен и апробирован метод учета влияния приливов в региональных климатических моделях морских акваторий на примере моря Лаптевых (руководитель работ — д. ф.-м. н., профессор Б. А. Каган).

По результатам численных экспериментов сравнивались значения максимальной высоты волны в начальных условиях, т. е. полученные по спектральной модели WAVEWATCH, и в конечных условиях, полученные после работы фазо-разрешающей модели. В 12 случаях высота максимальной волны не изменилась по сравнению с исходной, в 12 уменьшилась, в остальных 25 случаях обнаружено заметное увеличение высоты максимальной волны.

На рис. 1.6 показано распределение вероятности для поля возвышения поверхности и для третьего момента поля возвышения, характеризующего заостренность

В рамках исследования приливных изменений регионального климата моря Лаптевых на основе высокоразрешающего моделирования воспроизведены пространственные распределения климатических характеристик и интегральных по глубине составляющих бюджета бароклинной энергии в море. Микроструктурные измерения в море Лаптевых показали эпизодическое, коррелирующие с полусуточным приливом, усиление диссипации кинетической энергии турбулентности на шельфе и на континентальном склоне примерно на два порядка величины по сравнению с фоновыми значениями. Современные модели климата моря могут включать приливное воздействие, но их пространственного разрешения недостаточно для корректного воспроизведения внутренних приливных волн. Считается, что даже при явном учете приливного форсинга, если пространственное разрешение недостаточно, требуется дополнительная параметризация приливного диапикнического перемешивания, обусловленного эффектами внутренних приливных волн. Все существующие параметризации приливного перемешивания основаны на приближении «слабого взаимодействия», когда различие частот фоновой и приливной турбулентности велико и можно пренебречь нелинейным взаимодействием между ними. В этом случае влияние приливного диапикнического перемешивания учитывается путем сложения его с фоновым турбулентным перемешиванием. В большинстве параметризаций для определения коэффициента диапикнической диффузии используется формула Осборна

$$\kappa_p \approx 0.2 \langle -\dot{\epsilon} / \rho \rangle N^{-2},$$

где $\dot{\epsilon}$ — локальная скорость диссипации бароклинной приливной энергии; ρ — средняя плотность морской воды; N — частота плавучести Брента-Вяйсяля; угловые скобки означают усреднение за приливный цикл. Основное различие подходов заключается в определении диссипации бароклинной приливной энергии. Наиболее популярные параметризации предполагают, что диссипация бароклинной приливной энергии может быть описана орографическим сопротивлением, в этом случае аргументами для ее определения выступают диссипация баротропной приливной энергии и вертикальный масштаб вырождения, на котором диапикническая диффузия убывает по экспоненциальному закону с расстоянием от дна.

Предлагается другой способ учета диапикнического перемешивания, основанный на непосредственных модельных оценках диссипации бароклинного прилива. Для этого ранее была решена вспомогательная задача воспроизведения динамики бароклинного прилива (волна M_2) и его энергетических характеристик в море Лаптевых с помощью трехмерной гидростатической модели высокого разрешения QUODDY-4 [13]. На рис. 1.7 представлены результаты анализа расчетов. Максимальные значения диапикнической диффузии до $10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$ приходятся на районы с выраженной приливной динамикой (Хатангский залив) и изрезанным рельефом дна

(окрестности свала глубин, северо-западная часть моря). Был оценен вертикальный масштаб вырождения внутренних приливных волн, как расстояние от дна, ниже которого коэффициент диапикнической диффузии превышает $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. На шельфе масштаб вырождения равен 20–30 м, на континентальном склоне — 100–400 м, в глубоководной части моря — 50–100 м. Наблюдаемая пятнистая структура обеих характеристик на рис. 1.7 говорит в пользу использования предложенной параметризации приливного диапикнического перемешивания, в сравнении с параметризациями через орографическое сопротивление, в которых вертикальный масштаб вырождения задается постоянной величиной.

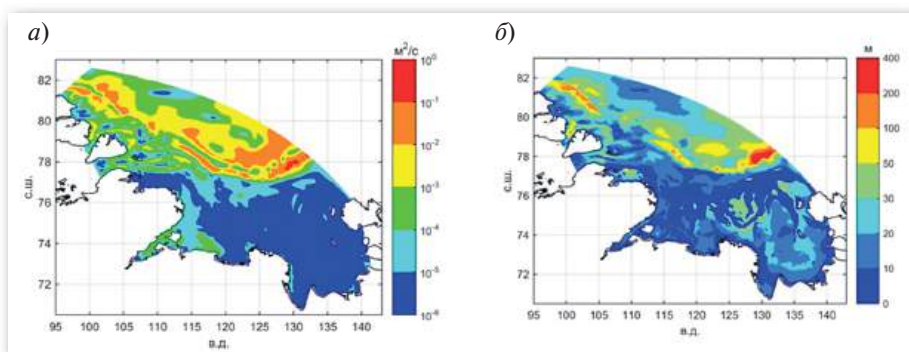


Рис. 1.7. Результаты моделирования бароклинного прилива в море Лаптевых:
a — средний по глубине коэффициент приливной диапикнической диффузии;
б — вертикальный масштаб вырождения внутренних приливных волн

Для апробирования предложенной параметризации была выполнена серия численных экспериментов по установлению климата моря Лаптевых в летний период с учетом и без учета приливного диапикнического перемешивания. Детали модельных расчетов, а также характеристики сеток и внешних воздействий изложены в [14]. По результатам моделирования нескорректированный и скорректированный (за счет приливной диапикнической диффузии) коэффициенты вертикального турбулентного перемешивания отличаются друг от друга на несколько порядков. Можно ожидать, что вклад эффектов внутренних приливных волн в формирование климата моря Лаптевых будет значимым наряду с другими климатообразующими факторами. Следующий пример из результатов моделирования иллюстрирует этот вывод. Оценивая средние (по площади моря) приливные изменения температуры (рис. 1.8) и солености (не показаны) в сравнении с климатической нормой, убеждаемся, что общепринятое игнорирование приливных изменений температуры и солености морской воды оправдано лишь частично: оно справедливо для средних (по площади моря) значений и не справедливо для экстремальных величин. Это означает, что существующие сейчас методы прогноза

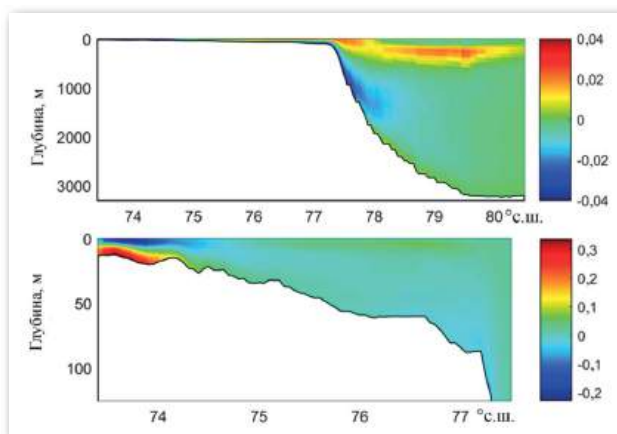


Рис. 1.8. Приливные изменения (разность численных решений с учетом и без учета приливов) температуры морской воды ($^{\circ}\text{C}$) вдоль меридионального разреза 120° в. д. в море Лаптевых. На верхнем фрагменте они показаны вдоль всего разреза, на нижнем — вдоль его мелководной части в увеличенном масштабе

и расчета экстремальных значений температуры и солености морской воды в части объема моря в данном случае нуждаются в ревизии. Результаты исследования должны использоваться в региональных климатических моделях арктических морей.

Выполнено моделирование баротропной приливной динамики Курильского региона как приложение гибридной модели длинноволновой негидростатической динамики регионов шельфа и материкового склона Мирового океана (руководитель работ — Н. Е. Вольцингер).

В классическом представлении геофизическая гидродинамика рассматривает задачи в так называемом гидростатическом приближении, полагая преобладание масштабов горизонтального движения над масштабом вертикального движения, что часто упрощает численное решение исходных уравнений. Однако над подводным горным рельефом это может оказаться не так. Горный рельеф представляется фактором, ограничивающим сферу пригодности гидростатических моделей.

Регионы с горным рельефом в Мировом океане разнообразны и повсеместны. Это зоны с изолированной подводной горой или подводным хребтом, зоны свала глубин окраинных морей, глобальные области крутого шельфа и материкового склона. Изрезанный подводный горный рельеф — неотъемлемая черта проливов островных дуг, фиордовых районов, проливов коралловых островов и архипелагов. В таких регионах негидростатический аспект оказывает доминирующее влияние.

Развитие новых подходов к моделированию динамики в областях с подводным горным рельефом в полной негидростатической постановке потребовало строгого обоснования в части постановки физических задач и методов их численного решения. Опираясь на эти результаты, доказано их преимущество для расчета приливной динамики в некоторых проливах Мирового океана, опускания плотных вод по континентальному склону, волнового поля, генерируемого подводным или надводным оползнем и ряда других процессов в трехмерных областях со сложной нерегулярной топографией.

Многолетние исследования в этом направлении подытожены в монографии [15], в которой продемонстрированы достижения в области вычислительной океанологии и ее приложений к гидрофизике океанов и морей.

Моделирование океанских приливов обычно выполнялось в гидростатической (Гс) постановке в единой области, включающей шельф, материковый склон и собственно океан на его ложе. Однако эти части океана по своей топографии совершенно различны, и рельеф предстает доминантой, определяющей тип модели. Основным положением при этом является постановка задачи для уравнений модели.

Моделирование приливной динамики проливов Курильской гряды и ее материкового склона имеет особое значение в связи с высоким геостратегическим престижем региона. Исключительная сложность рельефа области, содержащей десятки подводных вулканов, требует решения задачи в полной негидростатической (Нг) постановке; это делает необходимым многопроцессорную реализацию модели с высоким сеточным разрешением для ее репрезентативности. С целью кардинального уменьшения вычислительных затрат предложена рациональная методика рассмотрения и воспроизведения приливной динамики на 2D вертикальных разрезах области при решении на разрезах краевой задачи с повышенным сеточным разрешением.

Моделирование прилива на шельфе, равно как и в регионах меньшего масштаба с горным рельефом, в Гс постановке — нерепрезентативно, т. к. искажается физическое решение [15]. Использование для этого Нг модели сопряжено с двумя ее особенностями: усложнением алгоритма, содержащего блок решения 3D краевой задачи для уравнения Пуассона на каждом шаге по времени, и необходимостью высокого разрешения сеточной области, что требует многопроцессорной реализации.

Обратимся к рассмотрению промежуточной структуры между шельфом и открытым океаном — его материковому склону. При всем природном разнообразии таких структур их можно определить двумя геометрическими параметрами: протяженностью и крутизной. По протяженности материковый склон намного превосходит шельф, по крутизне столь же уступает ему. В какой же постановке моделировать динамику на материковом склоне: в Гс или в Нг? Однопроцессорное Гс моделирование выполнимо лишь на ограниченной части склона и при грубом разрешении, реализация же Нг модели даже с тысячами ядер на глубоком и протяженном $O(10^3)$ км материковом склоне

потребовала бы годы. Оба типа модели здесь непригодны. Но существует возможность моделирования склоновой динамики на 2D вертикальных разрезах области. Такая методика предложена и реализована в [16].

Методика 2D вертикальных разрезов области обладает рядом привлекательных особенностей. Она допускает расчет вертикального поля скорости с необходимой точностью, дает реалистичное представление о продольной скорости однонаправленного прилива, позволяет выполнить экономичный расчет динамического давления решением 2D краевой задачи для уравнения Пуассона и тем самым реализовать модель в Нг постановке на персональном компьютере.

Приводимые результаты моделирования приливной динамики на разрезах относятся к северо-восточной части материкового склона Тихого океана с двумя разрезами, достигающими проливов Буссоль и Четвертого Курильского (рис. 1.9–1.10). Поля вертикальной скорости на разрезах определяют значения $w = O(10^{-1} \text{ см/с})$. Относительно большие значения вполне репрезентативны, если учесть, что на относительном ровном дне они на 2–3 порядка меньше, и их рост обязан изрезанному рельефу склона. Несомненно, что они еще на порядок выше там, где разрез, протянутый на юго-восток, рассекал бы какую-нибудь из многочисленных высоких подводных гор на склоне вала Зенкевича. Сравнение придонной вертикальной скорости в Нг и Гс постановках показывает, что придонная Нг скорость в максимуме волны K_1 ее приливного цикла в несколько раз превосходит придонную Гс скорость. Из других интересных результатов следует отметить расчет горизонтальной скорости в подобласти Курило-Камчатского желоба, позволивший увидеть картину трансформации поля скорости вдоль желоба к северо-востоку до глубины несколько сот метров под действием суммарного прилива, содержащего 14 волн. Особый интерес представляет Нг расчет придонной вертикальной скорости при обтекании подводного вулкана в проливе Буссоль.

Выполненная работа [16] содержит постановку Нг и Гс задач в наиболее удобном для реализации виде, воспроизводит поля скорости и уровня на верхней части склона, предлагает рациональную методику моделирования на 2D вертикальных разрезах области для решения краевых задач в Нг постановке и, наконец, определяет тактику моделирования приливной динамики на протяженном склоне умеренной крутизны дна $\alpha \leq 0\left(\frac{\pi}{10}\right)$: решения 3D задач в Гс приближении на относительно небольших участках склона при необходимом разрешении и решения 2D задачи на вертикальных разрезах области в Нг постановке при повышенном разрешении.

Выполнены модельные исследования динамики суточных и полусуточных приливов у юго-восточного побережья п-ва Камчатка; по результатам моделирования суммарного прилива оценены максимальные течения, вихревые структуры и остаточная приливная циркуляция в акватории (к. г. н. Д. А. Романенков и к. ф.-м. н. Е. В. Софьина).

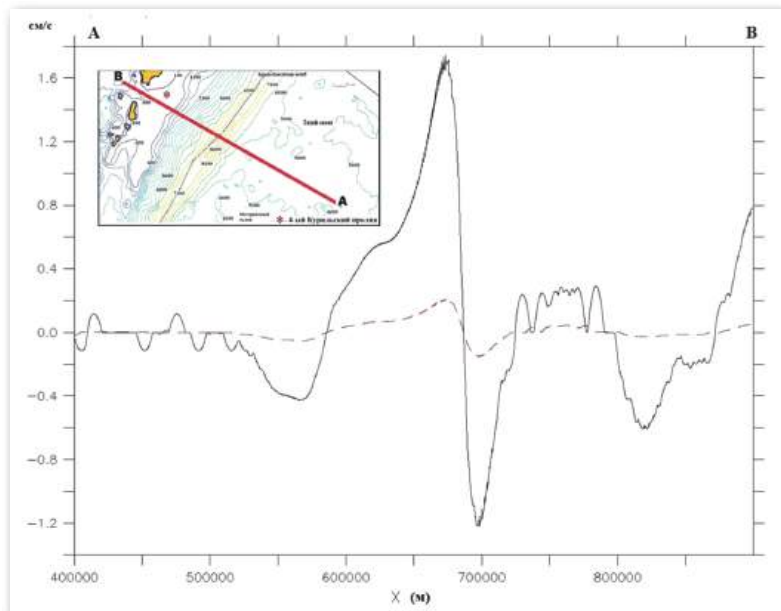


Рис. 1.9. Придонная вертикальная скорость суммарного прилива (см/с) на продольно-вертикальном разрезе А-В, рассекающем Курило-Камчатский желоб до Четвертого пролива в максимальный момент отливных течений. Сплошная линия — Нг решение, пунктирная — Гс решение. На врезке показано положение разреза в поле глубин

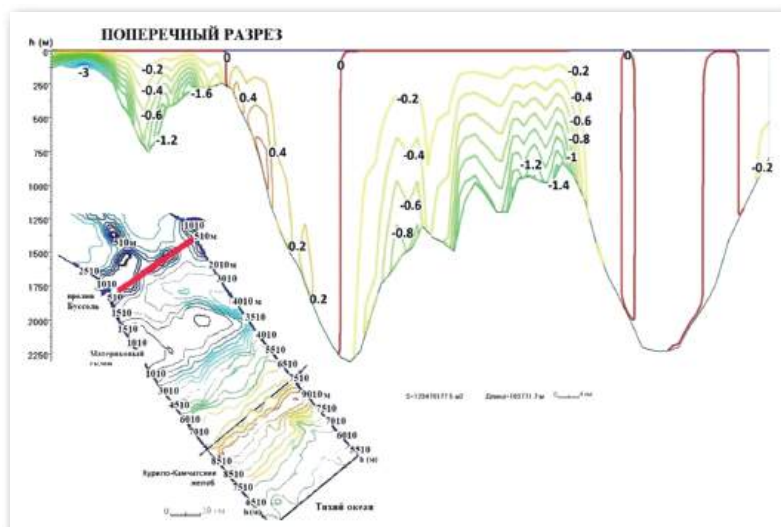


Рис. 1.10. Изолинии вертикальной скорости (см/с) на северном поперечном разрезе пролива Буссоль в максимальный момент отлива, в цикле волны K_1 . Нулевая изотаха выделена бордовым цветом. На врезке показано положение разреза в поле глубин

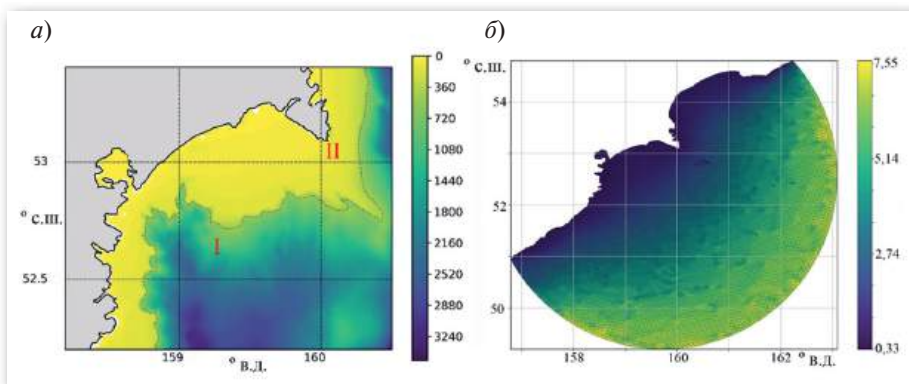


Рис. 1.11. Район исследования и модельная область:

а — батиметрия (м), I — Авачинский залив, II — мыс Шипунского,

б — неструктурированная сетка (цветом отображается средняя длина грани для каждого элемента в км)

Аккуратное воспроизведение приливов является необходимым условием для моделирования сложных шельфовых и прибрежных процессов. Задача исследования состояла в анализе результатов регионального моделирования баротропных приливов в акватории, примыкающей к юго-восточному побережью Камчатки (рис. 1.11а), которое будет использоваться для изучения сложной динамики и гидрологии этой акватории с очень скудным набором разнородных наблюдений. На данном этапе работы региональная модель FESOM—С была реализована для расчета баротропного прилива (без учета эффектов стратификации).

Конечно-объемная модель FESOM—С использует для расчета неструктурированные сетки [17]. Для района, примыкающего к юго-востоку Камчатского полуострова, была построена неструктурированная триангуляционная сетка с равномерно изменяющимся размером элементов (рис. 1.11б) и с локальным сгущением, допускающим надежное разрешение баротропного масштаба, который в нашей модельной области варьируется от 50 до 2500 км. Число узлов сетки — 37 738, количество треугольных элементов — 74 226, размер ребер элементов варьирует от 330 до 7800 м с минимальными значениями в мелководной области.

Для расчета моноприлива задавалась одна из двух гармоник: полусуточная M_2 (период $T = 12,42$ ч) или суточная K_1 (период $T = 23,93$ ч) без учета астрономических аргументов и нодальных множителей. Расчет велся до установления численного решения на квазипериодический режим. Моноприлив устанавливался меньше чем за 20 периодов. Для оценки гармонических постоянных моноприлива выполнялся анализ Фурье численного решения за последний приливной цикл расчета. Сравнение результатов моделирования с мареографными данными наблюдений было совмещено с экспериментами

по чувствительности решения региональной модели к заданию условий на открытой границе из глобальных моделей TPX09 и FES2014.

Результаты моделирования включают приливные карты уровня и течений суточного и полусуточного приливов. На рис. 1.12 показаны эллипсы приливных течений. Течения суточной гармоника преобладают над течениями полусуточной, обнаруживая усиление не только над банкой у мыса Шипунский, но и на шельфе северной части Авачинского залива и в юго-западной части области, где шельф становится заметно шире. Это может быть связано с образованием шельфовых волн суточного диапазона. Их длины более чем на порядок короче длины основной энергонесущей волны Кельвина, что и проявляется в наблюдаемой неравномерности приливных характеристик [18].

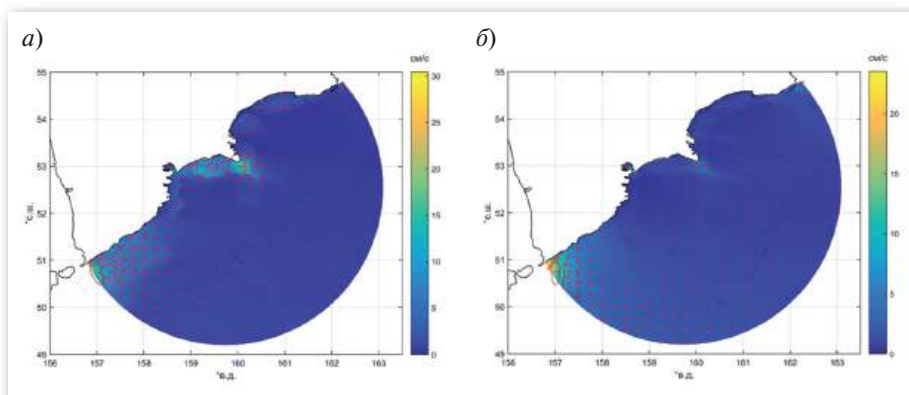


Рис. 1.12. Эллипсы приливных течений основных гармоник: а — K1, б — M2. Амплитуда скорости приливных течений (большая полуось приливного эллипса) изображена цветом, эллипсы показаны после интерполяции характеристик течений на равномерную сетку

Модельный суммарный прилив был инициирован заданием на открытой границе области комбинацией 11 гармонических составляющих M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, M4. Анализ суммарного прилива производился для синодического месяца 29,5 суток после установления решения за пять синодических месяцев. По результатам моделирования для суммарного прилива были оценены максимальные скорости течений, остаточная циркуляция и завихренность. Интегральной оценкой указанных характеристик может служить поле потоков приливной энергии, осредненное за период расчета (рис. 1.13). Суммарный прилив создает фоновый перенос энергии юго-западного направления во всей области и антициклонический вихрь к югу от мыса Шипунский. Вдоль склонов каньонов модель предсказывает сдвиговые приливные течения с резкими градиентами завихренности разного знака (не показаны). Локальное усиление потоков энергии хорошо заметно в этой части Авачинского залива (рис. 1.13, врезка).

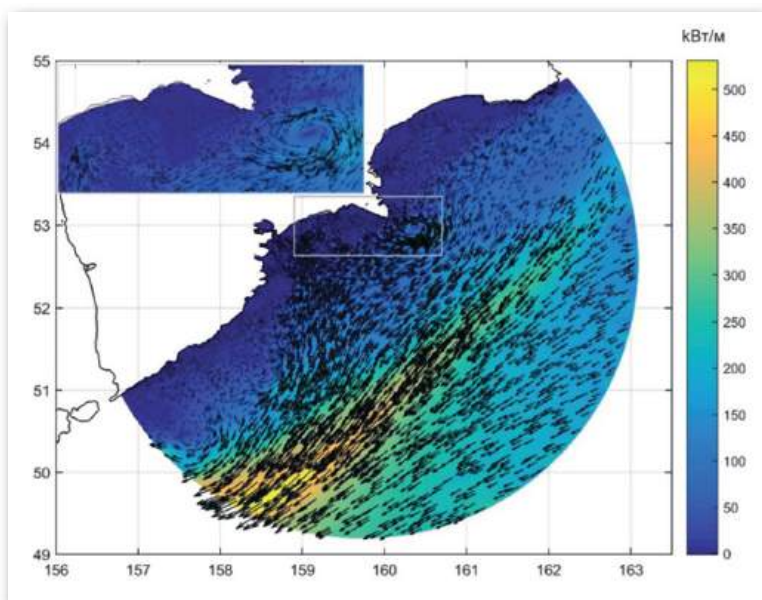


Рис. 1.13. Потoki энергии суммарного прилива

Можно заключить, что численная модель приливной динамики была успешно реализована для моделирования баротропного прилива вдоль юго-восточной части п-ова Камчатка и прилегающей акватории [19]. Получены новые детальные приливные карты уровня и течений основных гармоник в акватории. Моделирование суммарного прилива было выполнено впервые для данного района. Оценены максимальные течения и вихревые структуры, связанные с приливными течениями. Расчет выявил значимую остаточную приливную динамику на шельфе и материковом склоне Авачинского залива.

Научное сотрудничество

Сотрудники Лаборатории численных экспериментов по динамике океана взаимодействуют с учеными Центра Полярных и Морских исследований им. Гельмгольца Института Альфреда Вегенера (Германия, г. Бремерхафен) и Университета г. Мельбурн (Австралия). За последние годы сделаны доклады на Всероссийских конференциях «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2022, ГА-2024), «Природные опасности и катастрофы: история, прогноз, защита» (2025), «Моря России: приоритеты, практика, прогноз» (2021, 2023), «Морские исследования и образование» (MARESEDU — 2024, 2025).

ОКЕАНИЧЕСКИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Лаборатория моделирования океанских биогеохимических циклов была основана в 1998 году. Первым заведующим лабораторией стал доктор физико-математических наук Владимир Алексеевич Рябченко, который продолжает осуществлять научное руководство коллективом. В настоящее время в составе лаборатории работают десять сотрудников: член-корреспондент РАН Н. Н. Филатов, доктор физ.-мат. наук В. А. Рябченко, кандидаты наук А. Ю. Дворников (заведующий лабораторией), В. А. Горчаков, А. В. Исаев, С. Д. Мартыянов, Р. Е. Ванкевич, Т. И. Малова, С. Н. Лоза и инженер-программист С. С. Пугалова.

Основные направления исследований

Лаборатории моделирования океанских биогеохимических циклов за 2021–2025 гг.:

- Климатические изменения, включая экстремальные, в регионе Южной Азии.
- Влияние изменений климата на экосистемы и эвтрофирование крупных озер Балтийского бассейнового округа.
- Высокорастворимое моделирование динамики и биогеохимических циклов в высокоширотных морях России.

Модельные оценки изменений климата в Южной Азии

Благодаря международному сотрудничеству, поддержанному Российским научным фондом, была выполнена большая работа по изучению влияния изменений климата на экстремальные явления в Южной Азии [20–22].

Используя новую версию региональной модели океана в составе региональной модели системы Земли (МСЗ), оценены воздействия полностью связанной интерактивной морской биогеохимической модели на воспроизведение современного климата Индийского океана в период 1950–2005 гг. В результате экспериментов с региональной МСЗ обнаружено, что в расчете, в котором ослабление света рассчитывается с учетом обратной связи между температурой воды и фитопланктоном (INDB), средняя температура поверхности моря (ТПМ) ниже на большей части Индийского океана в тропиках по сравнению с эталонным экспериментом (INDJ), в котором используется постоянный коэффициент ослабления света (равный $0,06 \text{ м}^{-1}$), типичный для глобальных расчетов с МСЗ. Установлено также, что наиболее сильные различия (более $1 \text{ }^\circ\text{C}$) в ТПМ наблюдаются в летний период (рис. 2.1) [20].

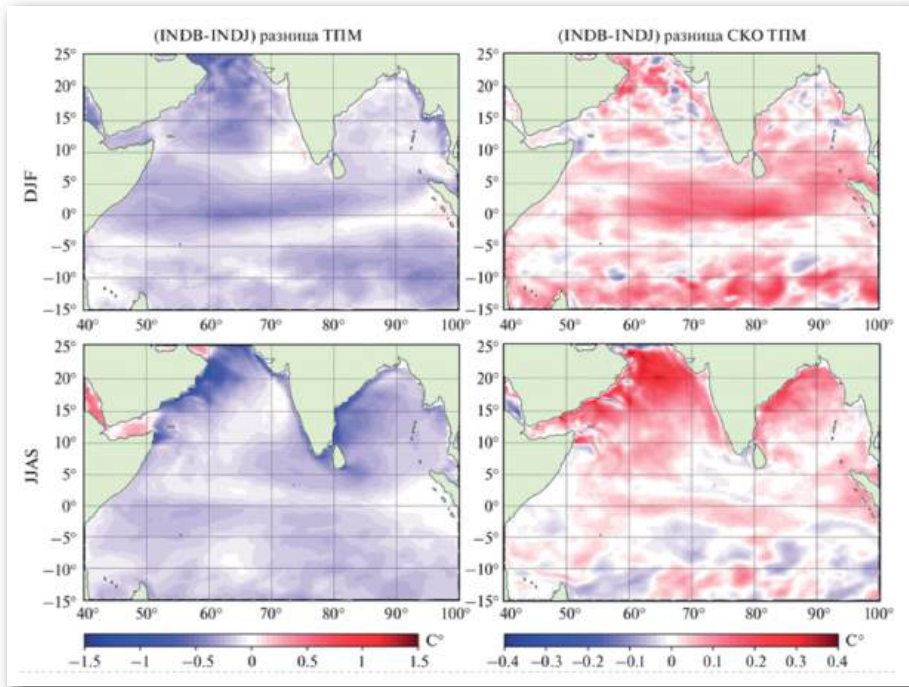


Рис. 2.1. Разность между расчетами INDB и INDJ для средней климатической ТПМ (левый столбец) и ее среднеквадратичного отклонения СКО ТПМ (правый столбец) при усреднении за период 1975–2004 гг.

В зимний сезон (DJF) использование параметризации ослабления света в расчете INDB приводит к более низкой ТПМ, которая становится на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ холоднее в северной части Аравийского моря. Исключение составляют районы у юго-западного побережья Индии, северо-западного побережья Индонезии и восточной части Андаманского моря, где наблюдается незначительное повышение ТПО, не превышающее $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Летом (JJAS) разница в ТПМ между двумя расчетами еще более заметна, особенно в северной части Аравийского моря и вдоль восточного побережья Индии. ТПМ в INDB также характеризуется более сильной изменчивостью, при этом стандартное отклонение ТПМ примерно на $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем в INDJ.

В эксперименте с INDB отмечается также охлаждение приповерхностных слоев океана и смещение термоклина вверх (рис. 2.2) [20]. Последнее, а также сезонные изменения коэффициента ослабления света заметно приближают модельные результаты к данным наблюдений [20, 21]. Таким образом, включение полной обратной связи между температурой воды и фитопланктоном с соответствующим коэффициентом ослабления света в целом понижает ТПМ и температуру воды в подповерхностных слоях тропической части Индийского

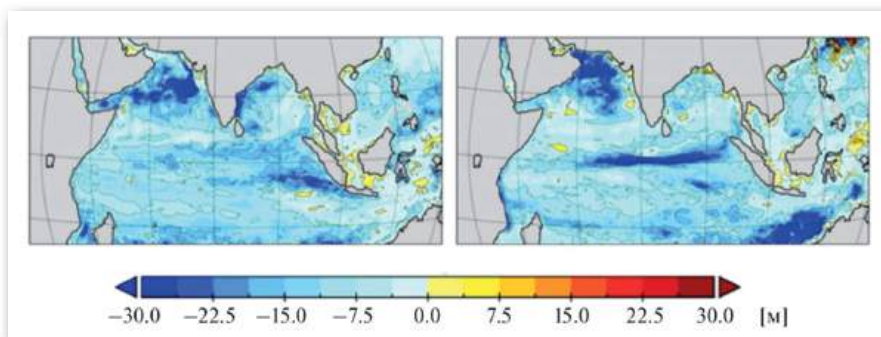


Рис. 2.2. Разница в глубине термоклина между двумя расчетами (INDB-INDJ) для JJAS — июнь-сентябрь (слева) и DJF — декабрь-февраль (справа) при усреднении за период 1975–2004 гг.

океана, что имеет серьезные последствия для взаимодействия океана и атмосферы и, следовательно, для моделирования регионального климата.

Показано, что включение полной обратной связи температура воды — фитопланктон в эксперименте INDB привело к улучшению (по сравнению с INDJ) воспроизведения глубины термоклина и сезонных изменений коэффициента ослабления света. Отмечено существенное локальное влияние хлорофилла, связанного с фитопланктоном, на модельную ТПМ, что в дальнейшем приводит к изменению динамики атмосферы. Из-за временной изменчивости концентрации *хлорофилла-а* в поверхностном слое океана и последующих изменений в поглощении света, ТПМ гораздо более изменчива в эксперименте INDB, чем в INDJ.

В рамках этой работы также были сделаны прогностические оценки изменений климата в Южной Азии на будущее, в период 2006–2099 гг. [23–25]. Проанализированы опасности и риски, связанные с тепловыми волнами над Индией, как для текущего климата, так и на будущее с использованием наборов данных о социально-экономической уязвимости и температуре в течение летнего (апрель-июнь) сезона. Случаи аномальной жары были рассчитаны на будущее до конца текущего столетия с использованием МЗС, согласно воздействиям предусмотренными сценарием RCP 8.5.

Результаты исследования показывают, что в условиях изменения климата тепловые волны станут более частыми и интенсивными, что приведет к увеличению рисков для населения Индии (рис. 2.3) [23]. Особую озабоченность вызывает рост уязвимости в регионах с высокой плотностью населения и низким уровнем дохода, где адаптационные возможности ограничены. Для снижения этих рисков необходимы срочные меры по адаптации и смягчению последствий, включая улучшение инфраструктуры, повышение уровня образования и доходов населения, а также снижение выбросов парниковых газов. Одним из ключевых аспектов адаптации является повышение устойчивости населения к экстремальным температурам. Это может быть достигнуто

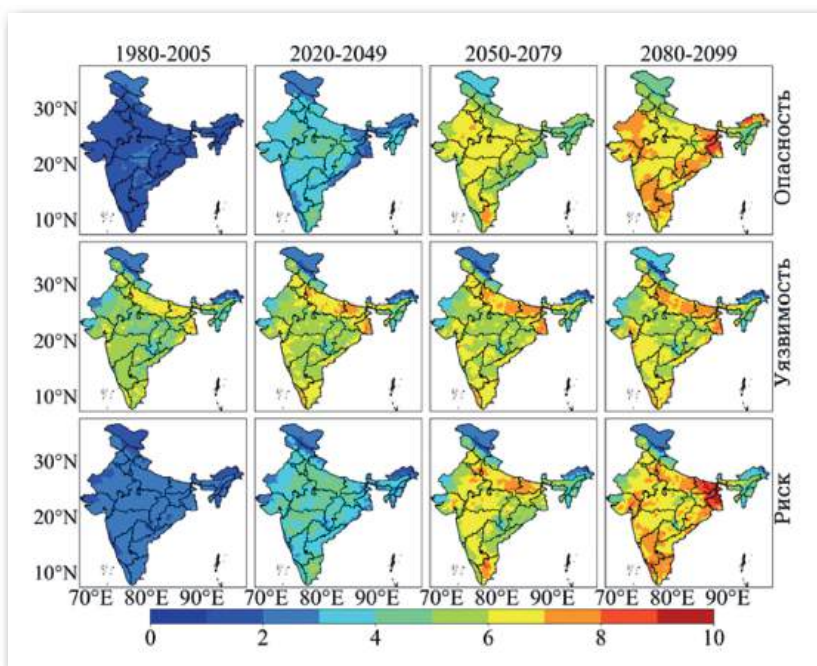


Рис. 2.3. Поля прогнозируемой опасности (верхняя панель), уязвимости (средняя панель) и риска (нижняя панель) за периоды 1958–2005 гг. (первая колонка), 2020–2049 гг. (вторая колонка), 2050–2079 гг. (третья колонка) и 2080–2099 гг. (четвертая колонка)

за счет улучшения доступа к медицинским услугам, создания систем раннего предупреждения об аномальной жаре и разработки стратегий городского планирования, направленных на снижение эффекта «теплового острова». Кроме того, важно учитывать социально-экономические факторы, такие как уровень дохода, образование и занятость, которые играют важную роль в определении уязвимости населения.

Исследование предоставляет информацию для разработки стратегий смягчения последствий и будущего адаптивного планирования в условиях риска аномальной жары, что является одной из задач в рамках программы *Цели в области устойчивого развития 13* (Sustainable Development Goals, SDG13).

Оценка реакции экосистем Онежского и Ладожского озер на климатические изменения

Одна из важных проблем современной лимнологии — диагноз состояния и долгосрочное прогнозирование состояния водных экосистем крупных озер для планирования экономической деятельности, рационального использования и охраны внутренних водоемов. Несмотря на предпринимаемые

природоохранные мероприятия в отношении таких крупных озер, как Великие Американские, Байкал, Ладожское и Онежское, перспективы сохранения их экосистем в целом весьма неопределенны. Продолжается эвтрофирование, медленно восстанавливаются экосистемы, появляются новые источники ухудшения качества вод.

Накопленный сотрудниками лаборатории опыт моделирования морских экосистем был распространен на оценку состояния и прогнозирование изменений гидрологического режима и экосистем крупных озер. Изменения гидрологического режима и экосистем Ладожского и Онежского озер исследовались по данным натурных наблюдений и моделирования биогеохимических потоков вещества. Экспериментальные исследования показали, что за период 1951–2016 гг. при потеплении климата на водосборе озер с конца 80-х гг. XX в. наблюдается устойчивое превышение нормы средней годовой температуры воздуха, а наиболее значимые ее изменения характерны для зимних месяцев. При потеплении климата и значительной межгодовой изменчивости суммарного речного притока и стока из озер за период 1955–2016 гг. тренды за 60 лет отсутствуют, рост годовых сумм осадков компенсируется ростом суммарного испарения. Процесс трансформации гидрологического и химико-биологического режимов Ладожского и Онежского озер представляет собой последовательность этапов, в течение которых менялся вклад внешних антропогенных и климатических факторов, а также роль процессов внутри водоемов.

Онежское озеро

Для изучения этих процессов была разработана трехмерная эко-гидродинамическая модель Онежского озера [26–29]. В качестве блока биогеохимических циклов использовалась модель, разработанная и успешно применявшаяся для Балтийского моря. В качестве гидродинамической основы модели была использована модель Массачусетского технологического института MITgcm. Модель использовалась для реконструкции динамики экосистемы Онежского озера за три десятилетия (1985–2015 гг.) на сетке с горизонтальным шагом 2×2 км. Сравнение с доступными данными натурных наблюдений показывает, что результаты расчетов достаточно репрезентативны (рис. 2.4).

Анализ численных экспериментов, выполненных на разработанной модели, подтвердил наличие мощного весеннего цветения диатомовых водорослей, предполагавшееся в опубликованной ранее фенологической схеме, основанной на данных натурных наблюдений. Начало весеннего цветения определяется увеличением светового потока в условиях обратной стратификации и впоследствии поддерживается весенней конвекцией, характерной для пресноводных водоемов. Вклад весеннего цветения в формирование годовой продукции Онежского озера составляет около 50% от годовой продукции, которая составляет 176,2 тыс. тонн углерода в год. Интенсивность внутреннего круговорота фосфора и азота значительно пре-

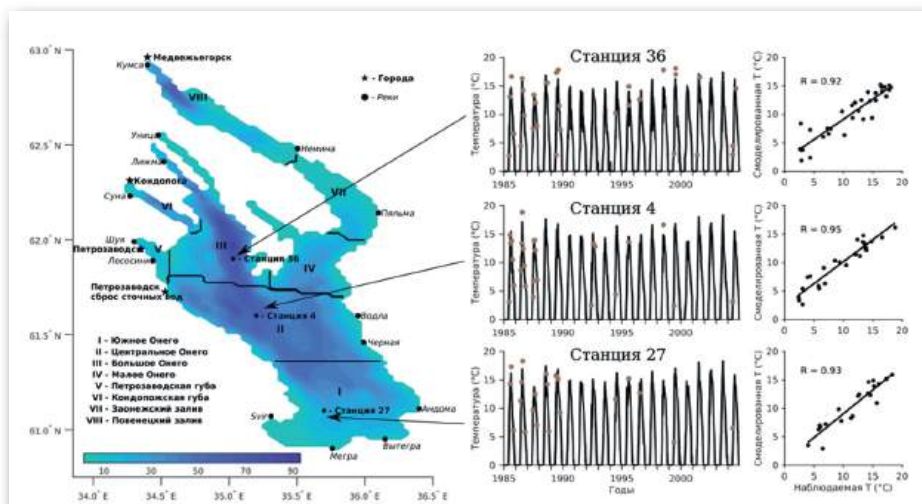


Рис. 2.4. Сопоставление результатов моделирования температуры с данными наблюдений в поверхностном слое в открытых районах Онежского озера на станциях мониторинга

вышает обмен через внешние границы системы. Время лимнического оборота, определяемого внешними воздействиями, составляет 3,2 года для фосфора и 12,4 года для азота. Время оборота в системе водная колонка — донные отложения составляют 47 лет для фосфора и 17 лет для азота. Более короткое время оборота азота объясняется денитрификацией донных отложений, часто игнорируемой в лимнологических исследованиях. Основываясь на результатах верификации, можно сделать вывод о том, что разработанная модель может быть использована для проведения оценок будущего состояния Онежского озера при различных сценариях социо-экономического развития региона в условиях меняющегося климата.

Ладожское озеро

Для Ладожского озера создана модель, которая используется для исследования термогидродинамики, экосистемных процессов и биогеохимических круговоротов, протекающих в озере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий [26, 30, 31]. В отличие от существующих моделей экосистемы Ладожского озера, предлагаемая модель реализована на сферической сетке высокого разрешения (шаг сетки по горизонтали ≈ 1 км), содержит модуль бентосного слоя и описывает циклы азота и фосфора в водной толще и донных отложениях. Выполнен расчет сезонной и межгодовой изменчивости состояния Ладожского озера в период 1979—2018 гг. при задании в качестве форсинга атмосферного воздействия и стока рек, впадающих в Ладожское озеро, для гидротермодинамического модуля и поступления биогенных элементов из атмосферы и с суши для биогеохимического модуля.

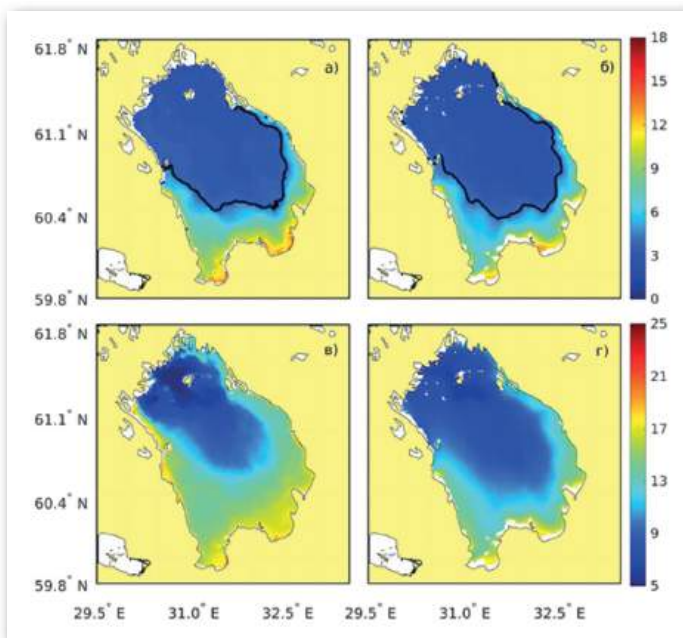


Рис. 2.5. Среднемноголетние (за период 2000–2020 гг.) распределения поверхностной температуры (°C) Ладожского озера для мая (а, б) и июня (в, з) по спутниковым данным (а, в) и результатам моделирования (б, з) (черная линия показывает положение изотермы 4 °C)

Сравнение результатов расчета современного климатического состояния Ладожского озера в период 1979–2018 гг. по трехмерной эко-гидродинамической модели с имеющимися данными спутниковых и экспедиционных наблюдений показало, что модель правильно воспроизводит климатический сезонный ход поля поверхностной температуры (рис. 2.5) и ее вертикально-горизонтального распределения.

Согласно оценкам функции качества, модель также достаточно хорошо воспроизводит средние значения и диапазон изменений основных характеристик экосистемы Ладожского озера. Выявленные особенности климатического сезонного хода не противоречат общепринятым представлениям о функционировании экосистем пресноводных озер бореальной зоны (рис. 2.6).

Разработанная модель может быть адаптирована для учета влияния других источников биогенной нагрузки (промышленные и сельскохозяйственные, включая аквакультуру) на функционирование экосистемы озера, которое до сих пор не исследовалось. Созданный инструмент ляжет в основу построения системы мониторинга экологического состояния системы «Ладога — р. Нева — Невская губа — Финский залив — Балтийское море», необходимой для улучшения качества жизни населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

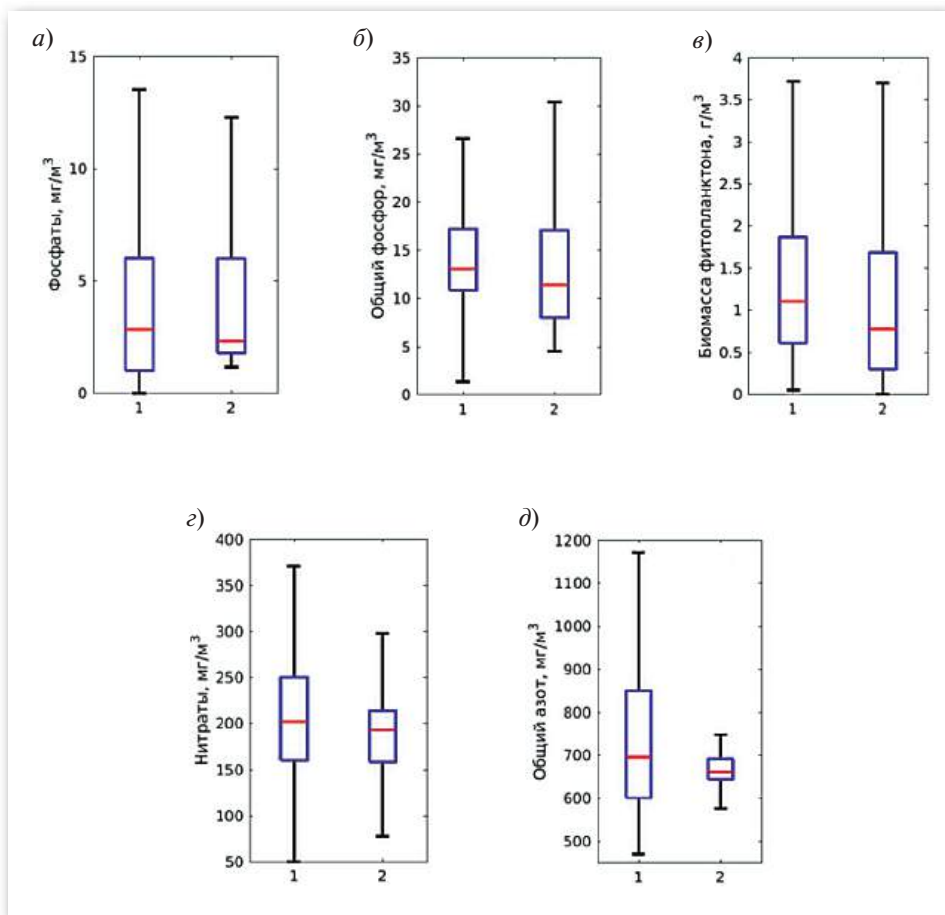


Рис. 2.6. Сравнение результатов моделирования с данными натурных наблюдений для фосфатов (а), общего фосфора (б), биомассы фитопланктона (в сыром весе) (в), нитратов (г) и общего азота (д) для периода 1991–2020 гг.; 1 — данные наблюдений; 2 — результаты моделирования

(Красная линия — медианное значение, синяя — квартили 25 и 75%, черная — минимум и максимум)

Высокоразрешающее моделирование динамики, термохалинной структуры и биогеохимических циклов Карского моря

Разработана региональная модель Карского моря высокого разрешения (KASM), эффективное горизонтальное разрешение которой для двух различных конфигураций составляет соответственно 900 и 1500 м. Это позволяет явно разрешить первый бароклинный радиус деформации Россби и моделировать мезомасштабную вихревую динамику.

Проведена серия численных экспериментов, направленных на изучение: 1) эволюции речных плюмов и динамики фронтальной зоны в Карском море и влияния речного стока на моделируемую термохалинную структуру вод, 2) взаимодействия физических и биогеохимических процессов в Карском море путем использования в расчетах совместной физико-биогеохимической модели.

Показано, что использование среднесуточного речного стока из системы Global Flood Awareness System (GloFAS) дает лучшее модельное решение, которое ближе к наблюдаемому вертикальному распределению температуры и солёности воды по сравнению с другими расчетами, в которых задавался климатический среднемесячный сток (рис. 2.7) [32].

Для калибровки биогеохимического модуля KASM был проведен ряд расчетов с объединенной физико-биогеохимической моделью. Данный биогеохимический блок, для краткости названный «ЕСО7», включает 7 трехмерных биогеохимических переменных, а именно: фитопланктон, зоопланктон, детрит, растворенный неорганический азот, общий растворенный неорганический углерод, твердые частицы детрита (CaCO_3), щелочность. Хотя данная биогеохимическая модель довольно проста по сравнению с другими современными моделями, она отражает основные черты цветения фитопланктона. Модель включает блок углеродного цикла и позволяет исследовать потоки CO_2 в Карском море, что представляет особый интерес в связи с постепенным уменьшением площади морского ледяного покрова в Арктике.

Пример модельной концентрации фитопланктона в поверхностном слое и рассчитанного потока CO_2 между океаном и атмосферой представлен на рис. 2.8. Зоны повышенного потока CO_2 , направленного из атмосферы в море, совпадают с зонами повышенной первичной продукции вследствие ассимиляции растворенного в воде углерода при росте фитопланктона.

Установлено, что основными параметрами настройки биогеохимической модели являются начальный наклон Р-І кривой, скорость оседания детрита, ослабление света за счет поглощения водой и фитопланктоном и скорость роста фитопланктона. Кроме того, отношение $\text{Chl}:\text{C}$ в фитопланктоне — важный параметр, ответственный за адекватную калибровку и проверку результатов моделирования по наблюдаемой концентрации хлорофилла-а.

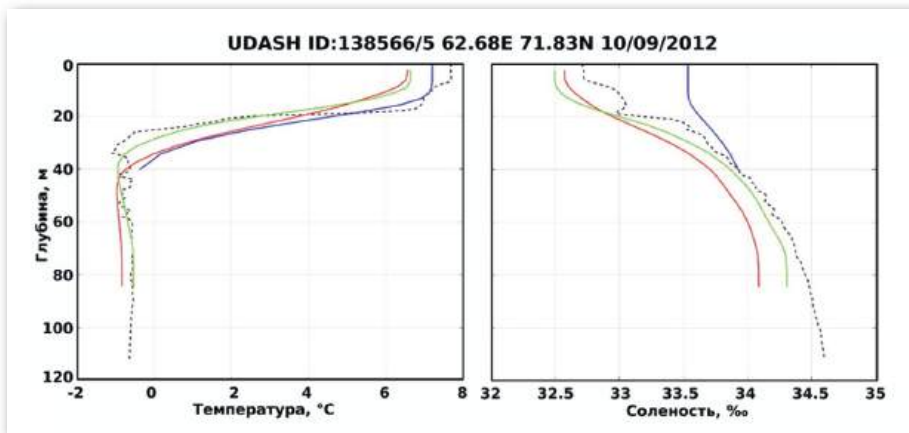


Рис. 2.7. Вертикальные профили температуры воды T (слева) и солёности S (справа) по данным измерений, взятым из базы данных UDASH (черная пунктирная линия), по данным океанского реанализа MERCATOR (сплошная синяя линия) и по результатам региональной модели KASM, в которой использовался среднемесячный климатический (сплошная красная линия) и среднесуточный (сплошная зеленая кривая) речной сток

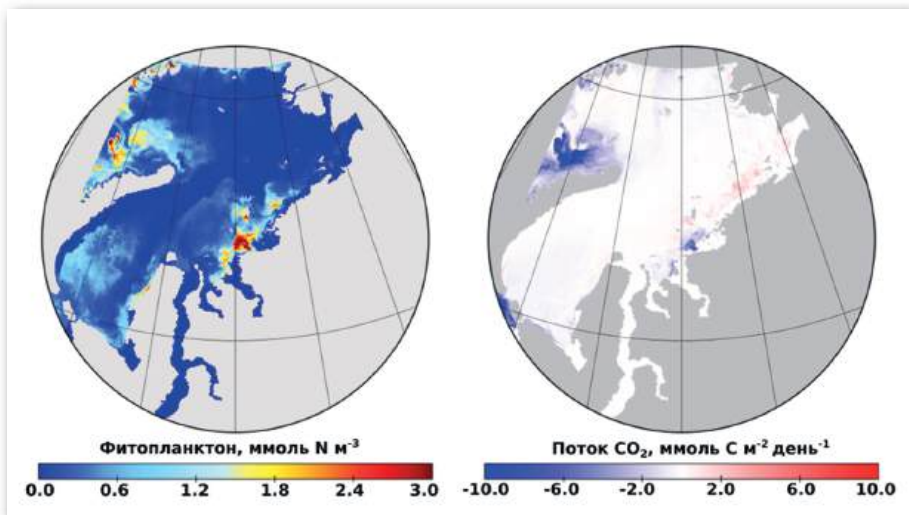


Рис. 2.8. Слева — концентрация фитопланктона в верхнем слое, 20 мая 2012 г., справа — поток CO₂ между океаном и атмосферой, 20 мая 2012 г.

Научное сотрудничество

Сотрудники лаборатории принимают активное участие в развитии международных научных связей. За последние годы сделан целый ряд докладов на научных конференциях.

При поддержке Российского научного фонда лаборатория принимала участие в выполнении международного проекта «Impact of climate change on South Asia extremes: A high-resolution regional Earth System Model assessment» (Влияние изменений климата на экстремальные явления в Южной Азии: оценки на основе региональной модели земной системы высокого разрешения), совместный российско-индийский проект между РНФ (проект № 19–47–02015) и DST (Департамент науки и технологий, правительство Индии). Зарубежный партнер: Индийский институт науки, образования и исследований, Бхопал, Индия.

ОПТИКА ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ

Лаборатория оптики океана и атмосферы СПбФ ИО РАН была создана в 1969 г. В настоящее время в составе лаборатории работают четверо сотрудников: кандидат физико-математических наук В. А. Глухов (заведующий лабораторией), кандидат технических наук Д. А. Никитин, О. В. Глитко и О. Н. Французов. До недавнего времени Лабораторию возглавлял кандидат физико-математических наук Максим Анатольевич Родионов, скоропостижно ушедший из жизни 2-го сентября 2024 г.

Максим Анатольевич более десяти лет возглавлял Лабораторию. Под его руководством были организованы и успешно проведены экспедиции в Черное, Баренцево, Карское, Охотское моря и в Авачинский залив у полуострова Камчатка. В последние годы Максим Анатольевич внес значительный вклад в организацию международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод (ONW)», собиравшей ведущих специалистов в области оптики океана. С уходом Максима Анатольевича коллектив Лаборатории понес невосполнимую утрату.

Важные научные результаты

Основным направлением исследований сотрудников Лаборатории оптики океана и атмосферы в 2021–2025 гг. стало совершенствование методов и средств дистанционного зондирования океана с судовых и авиационных носителей. Важными научными результатами Лаборатории за указанный временной период стали следующие:

1. Установлена связь между параметрами лидарных эхо-сигналов и гидрооптических характеристиками приповерхностного слоя. С использованием судового поляризованного лидара ПЛД-1 в западной части Карского моря получены регрессионные соотношения между показателем ослабления лидарного эхо-сигнала α и рядом важных гидрооптических характеристик — показателями ослабления света морской водой c и диффузного ослабления света K_d [33–36]. Лидарные измерения проводились синхронно с измерениями, проводимыми погружными приборами. На рис. 3.1а представлена диаграмма соответствия значений α и значений показателя ослабления света морской водой c , измеренных прозрачномером на этих станциях. Рис. 3.1а демонстрирует наличие линейной связи между α и c в указанном интервале изменения показателя ослабления.

На рис. 3.1б представлена диаграмма соответствия значений α и значений показателя диффузного ослабления света K_d . Значения K_d , $K_{d, \text{изм}^*}$ (отмечены черным цветом) были получены на станциях, выполняемых в светлое время

суток с помощью гиперспектрального радиометра Ramses (Trios, Германия) и приведены к условиям освещенности, соответствующим случаю только направленного излучения солнца, находящегося в зените. Для ряда станций с использованием данных измерений гидрооптических характеристик были рассчитаны $K_{d,p}$ (отмечены красным цветом). Пунктирной линией обозначена биссектриса, соответствующая ситуации, при которой $\alpha = K_{d,p}$. Полученные регрессионные связи α и c и α и K_d справедливы для технических характеристик лидара ПЛД-1 и конкретной геометрии зондирования.

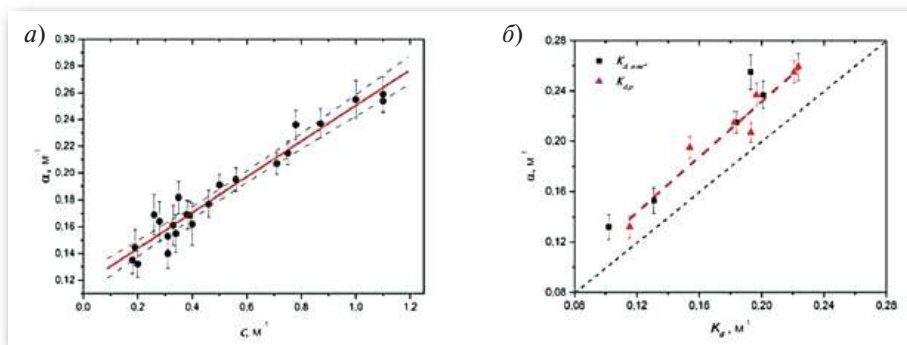


Рис. 3.1. Диаграмма соответствия значений α в слое 4–8 м и значений c , измеренных прозрачномером ПУМ-200 на этих станциях (а), а также значений $K_{d, \text{изм}^*}$ и $K_{d,p}$ (б) [34]

Использование регрессионных соотношений позволяет проводить лидарную съемку на ходу судна для получения пространственных распределений c и K_d . Пример применения регрессионных соотношений для оценки пространственного распределения показателя ослабления c на разрезе показан на рис. 3.2. Разрез выполнен вблизи ямальского шельфа и характеризуется наличием фронтальных зон.

Сопоставление пространственных распределений показателя ослабления c_L , полученного лидарным методом, и показателя ослабления c_f , полученного с помощью проточного измерительного комплекса ИО РАН, показаны на рис. 3.2а. Соответствующие распределения солёности S , температуры T и интенсивности флуоресценции ОРОВ I_{CDOM} показаны на рис. 3.2б. Красные треугольники на рис. 3.2а обозначают значения c , зарегистрированные прозрачномером на станциях в слоях 2–3 м и 4–8 м. Значения c_L и c_f достаточно близки на протяжении всего разреза. Распределение показателя ослабления, полученное с использованием лидарной съемки, хорошо отражает положение фронтов. Наличие этих фронтов подтверждается на распределениях солёности, температуры и интенсивности флуоресценции ОРОВ. На разрезе зарегистрирована отрицательная корреляция распределения солёности и интенсивности флуоресценции ОРОВ. Наличие такой корреляции может объясняться влиянием стока рек Обь и Енисей.

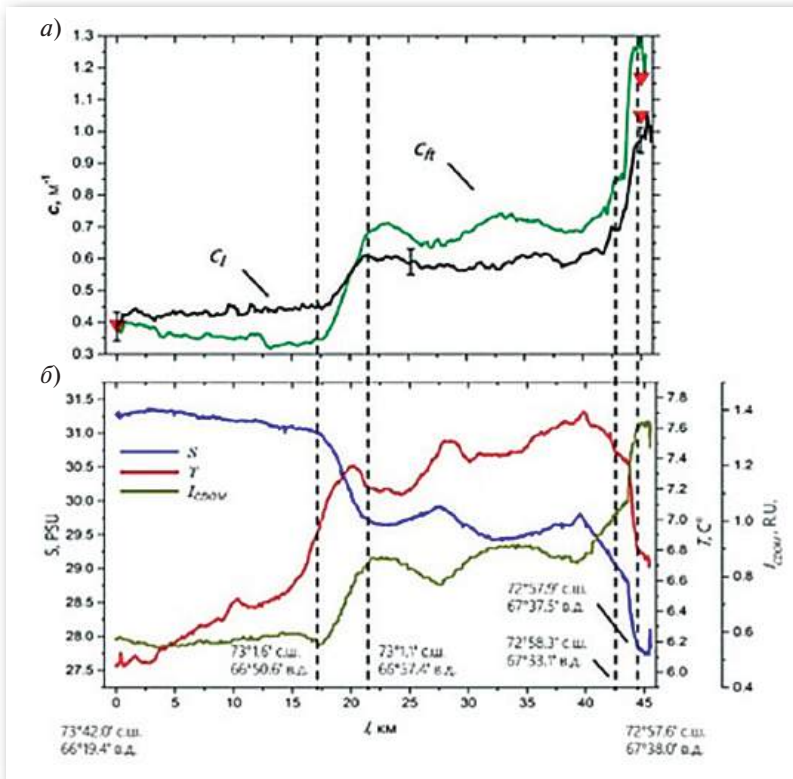


Рис. 3.2. Распределение гидрооптических и гидрологических характеристик на разрезе между станциями 7458 и 7459 по данным лидарной съемки и проточного измерительного комплекса:

а — распределения c_l и c_{ft} ; б — распределения S , T , I_{CDOM} [34]

2. На основе теоретических представлений о лидарных изображениях внутренних волн в случае двухслойной стратификации гидрооптических характеристик, полученных Л. С. Долиным, выявлены особенности формы лидарного эхо-сигнала, позволяющие при соответствующей обработке определить положение слоя скачка по данным лидарного зондирования [37]. Для оценки пространственно-временной изменчивости формы спада лидарного эхо-сигнала применяются функции аппроксимации, функциональный вид которой следует из лидарного уравнения, а также вейвлет-анализ выборок амплитуд лидарных эхо-сигналов на заданной глубине. Применение функции аппроксимации позволяет наглядно получить картину вертикальных смещений областей с резкими градиентами показателя ослабления, соответствующих границам слоя скачка плотности. Применение вейвлет-анализа позволяет определить период и локализацию квазипериодических процессов. При обработке целесообразно на первом этапе проводить автоматизированную

обработку с использованием вейвлет-анализа, а детальную обработку с использованием функций аппроксимаций проводить только для тех участков съемки, на которых выявлены квазипериодические процессы. Такой подход позволяет относительно быстро получить наиболее полную информацию.

На основе полученных результатов разработан метод лидарной регистрации внутренних волн в условиях двухслойной стратификации гидрооптических характеристик. С использованием разработанного метода выполнена комплексная обработка массива данных судовой лидарной съемки прибрежных районов Черного моря [38]. Общий объем обработанных данных составляет около 50 часов при частоте лидарного зондирования 1 Гц. Выявлено несколько записей данных лидарного зондирования, на которых были зарегистрированы квазипериодические процессы. Пример результатов обработки данных лидарной съемки показан на рис. 3.3 и 3.4. На рис. 3.3 приведен результат обработки галса с использованием функций аппроксимаций. На нижней границе выделяются четыре колебания, на верхней границе — только два наиболее интенсивных. Максимальная амплитуда на верхней границе составляет 0,6 м, а на нижней — порядка 1 м. Средний период колебаний составляет 7 мин. Результат вейвлет-анализа выборок амплитуд лидарных эхо-сигналов, полученных с глубины 18 м, представлен на рис. 3.4.

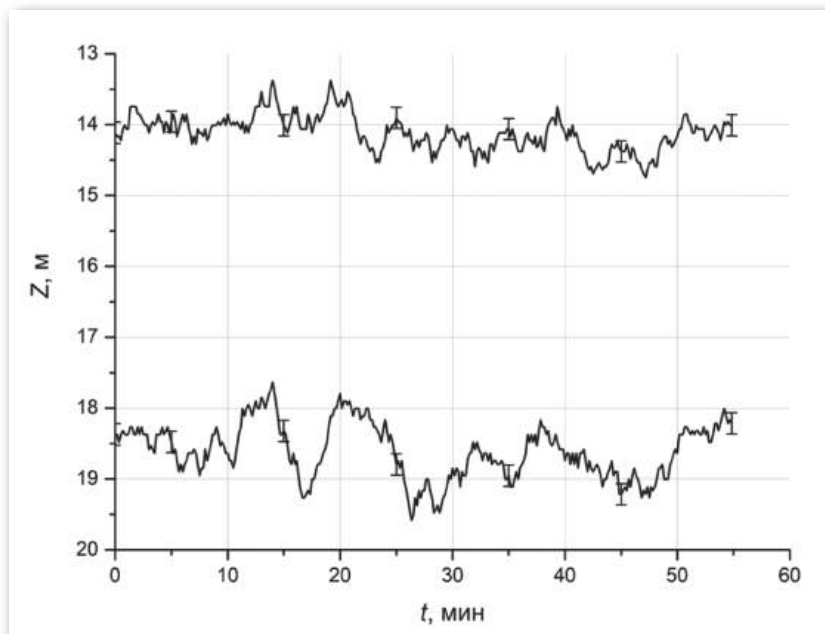


Рис. 3.3. Положение верхней и нижней границ исследуемого слоя, полученное в результате обработки данных лидарной съемки с использованием аппроксимирующих функций

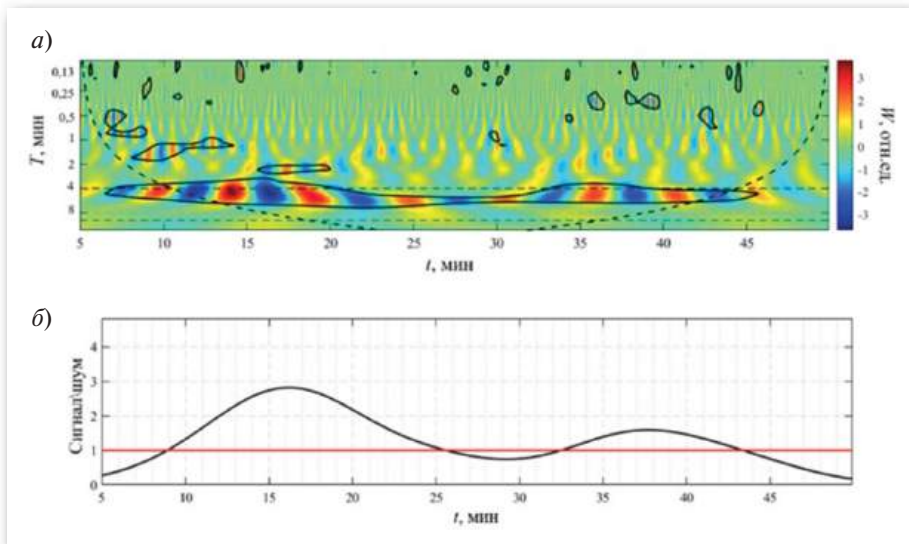


Рис. 3.4. Результат обработки амплитуд лидарных эхо-сигналов с фиксированной глубины 18 м с помощью вейвлет-анализа:

а — амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования, б — усредненная по временным масштабам мощность вейвлет-спектра, нормированная на девяностопятипроцентный уровень значимости по отношению к фоновому красному шуму [38]

Наиболее интенсивные колебания зарегистрированы в первой половине галса, что соответствует результату, полученному с использованием метода аппроксимаций. Полученные значения характеристик выявленных квазипериодических процессов — амплитуда и период колебаний, соответствуют результатам контактных измерений, проводимых в районе работ.

3. Натурные измерения характеристик отраженного от дна эхо-сигнала, выполненные в акватории Бечевинской бухты (Авачинский залив у полуострова Камчатка), показали, что зависимость величины и формы лидарного эхо-сигнала от протяженности трассы зондирования при регистрации слоев воды и морского дна имеет более сложный вид, чем это следует из общепринятой формы записи лидарного уравнения. Введение дополнительного члена в лидарное уравнение, определяющего дисперсию распределения освещенности в поперечном сечении бесконечно узкого пучка света, прошедшего через водный слой заданной толщины, позволило более точно описать полученные экспериментальные зависимости.

На рис. 3.5 приведены графики зависимости амплитуды эхо-сигнала для случая френелевского отражения от поверхности воды P_F , максимума от верхних слоев воды P_{\max} , а также значения амплитуды эхо-сигнала от дна P_b для глубин 8, 12 и 15 м, в зависимости от высоты полета H . С увеличением глубины зондирования показатель степени в геометрическом факторе в лидарном уравнении не является константой и с глубиной уменьшается

по абсолютному значению. Это связано с тем, что с ростом глубины дна увеличиваются радиус площадки R_b , через которую отраженное от дна излучение выходит в атмосферу. При относительно узком фиксированном угле поля зрения приемной оптической системы подъем высоты приводит к увеличению радиуса площадки на поверхности воды R , с которой приемник собирает рассеянное назад излучение. С увеличением глубины дна R_b достаточно быстро увеличивается и превосходит R , что определяет уменьшение показателя степени в геометрическом факторе.

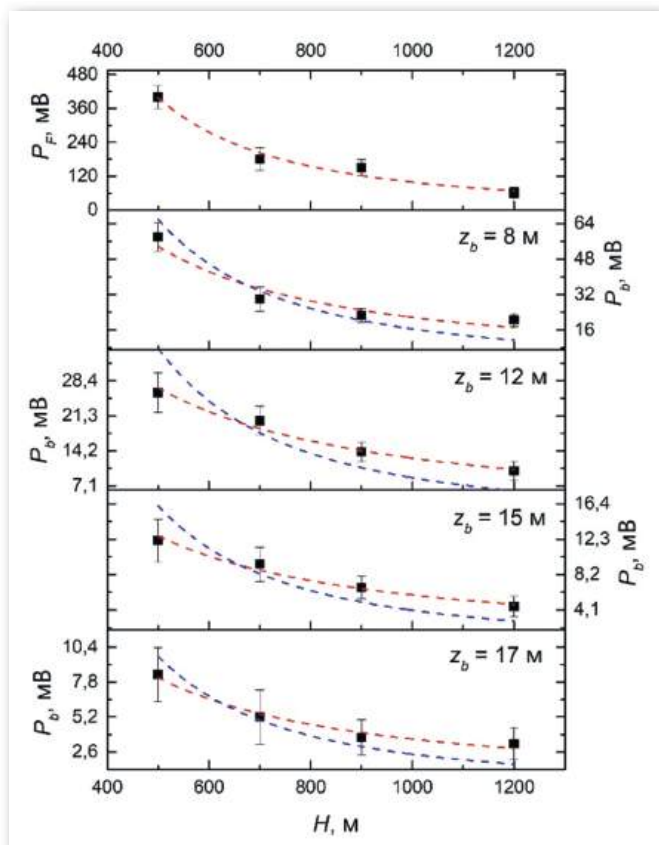


Рис. 3.5. Усредненные значения амплитуд эхо-сигналов при френелевском отражении от поверхности воды P_{Fr} , а также значения амплитуд эхо-сигналов от морского дна P_b для глубин 8, 12, 15 и 17 м, зарегистрированные с различных высот зондирования. Синей пунктирной линией обозначена аппроксимация экспериментальных данных с использованием общепринятой формы лидарного уравнения, красной — с использованием формы лидарного уравнения, учитывающего дисперсию распределения освещенности в поперечном сечении бесконечно узкого пучка света

Разработка и модернизация морских лидаров в Лаборатории оптики океана и атмосферы

В настоящее время сотрудниками Лаборатории активно эксплуатируются разработанные образцы морских лидаров судового (ПЛД-1) и авиационного базирования (АПЛ-4) [39]. Основные технические характеристики лидаров сведены в табл. 3.1. Внешний вид лидаров представлен на рис. 3.6 и 3.7. Каждый из лидаров имеет специально разработанный цифровой блок, осуществляющий управление, оцифровку эхо-сигналов, их запись на долговременном носителе, позиционирование и оперативную обработку результатов зондирования непосредственно в ходе лидарной съемки. Лидары отличаются небольшими размерами и низким энергопотреблением. С использованием этих лидаров сотрудниками лаборатории были выполнены измерения на Баренцевом, Карском и Черном морях и в акватории Финского залива Балтийского моря.

Таблица 3.1

Основные технические характеристики лидаров ПЛД-1 и АПЛ-4 [40].

Характеристика	ПЛД-1	АПЛ-4
Длина волны зондирующего излучения, нм	532	532
Длительность зондирующего импульса, нс	7	7
Энергия зондирующего импульса, мДж	20	45
Частота зондирования, Гц	1	1–30
Расходимость зондирующего пучка γ_L , мрад	5	5
Угол поля зрения приемной оптической системы ко-поляризованного канала 2γ , град. (мрад)	2 (35)	2 (35)
Диаметр входного объектива ко-поляризованного канала, мм	63	100
Угол поля зрения приемной оптической системы кросс-поляризованного канала 2γ , град. (мрад)	2 (35)	2 (35)
Диаметр входного объектива кросс-поляризованного канала, мм	100	100
Разрядность АЦП, бит	14	14
Частота оцифровки лидарных эхо-сигналов, ГГц	2,5	1,3



Рис. 3.6. Вид лидара ПЛД-1. Слева — оптический блок лидара ПЛД-1. Справа — оптический блок лидара, укрепленный на устройстве наведения



Рис. 3.7. Вид лидара АПЛ-4: справа — блоки лидара, размещенные в салоне самолета-лаборатории; слева — оптический блок лидара (вид со стороны оптического люка самолета-лаборатории)



Научное сотрудничество

Лаборатория Оптики океана и атмосферы СПбФ ИО РАН тесно сотрудничает с Лабораторией оптики океана ИО РАН.

За рассматриваемый период были проведены конференции:

1. Всероссийская конференция с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод» (ONW'2021, ONW'2023).
2. XXX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», 1–5 июля 2024 г.
3. Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 2022, 2024 гг.
4. Всероссийская конференция молодых ученых «Комплексные исследование морей и океанов», 2023 г.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОГРАНИЧНЫЕ СЛОИ

Лаборатория геофизических пограничных слоев была создана в 2013 г. В период с 2021 по 2025 гг. в составе лаборатории работали шесть научных сотрудников: д. г. н., доцент А. В. Зимин (руководитель лаборатории), кандидаты наук М. Ю. Белевич, О. А. Атаджанова, А. А. Коник, Е. И. Свергун, С. М. Гордеева (до 2023 г.), А. Я. Гольмшток (с 2023 г.) и научные сотрудники без степени Г. В. Жегулин (до 2023 г.), Т. М. Максимовская (с 2023 г.).

Сотрудники лаборатории активно участвуют в экспедиционных исследованиях Филиала, в рамках которых проводят уникальные работы в арктических морях — Белом, Баренцевом, Норвежском, Карском, а также в Тихом океане (подробнее см. Главу 6). Главными объектами их исследований являются фронтальные зоны, вихревые структуры и короткопериодные внутренние волны — явления, играющие ключевую роль в динамике отдельных районов Мирового океана. Помимо научной деятельности, сотрудники активно участвуют в подготовке молодого поколения ученых в рамках программы «Плавучий университет», которая сочетает образовательные инициативы с полевыми работами.

Наиболее важные события из жизни лаборатории

Коник А. А. 26.12.2022 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата географических наук «Изменчивость характеристик крупномасштабных фронтальных зон в Баренцевом и Карском морях в XXI веке» по специальности 1.16.17 — «Океанология».

Свергун Е. И. 26.12.2022 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата географических наук «Короткопериодные внутренние волны в шельфовых областях с выраженной приливной динамикой на примере Баренцева моря и Курило-Камчатского региона Тихого океана» по специальности 1.16.17 — «Океанология».

Максимовская Т. М. 03.06.2024 г. стала победителем конкурсного отбора 2024 г. на назначение стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов по приоритетному направлению стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

Основные направления исследований Лаборатории геофизических пограничных слоев за период 2021–2025 гг.

по государственному заданию:

- Верификация и сравнительный анализ спутниковых данных и модельных результатов для мониторинга фронтальных зон.

- Комплексное исследование фронтальных зон арктических морей в условиях меняющегося климата на основе разнородных данных.
- Анализ особенностей короткопериодных внутренних волн и субмезомасштабных вихрей на разнотипных шельфах приливных морей.
- Изучение термодинамических условий устойчивости и фазовых переходов газовых гидратов.
- Оценки возможностей использования математических конструкций в физических моделях.

по грантам:

- Грант РФФИ № 20–35–90054 (2020–2022) «Короткопериодные внутренние волны в приливных морях на разных типах шельфа».
- Грант РФФИ № 20–35–90053 (2020–2022) «Связь фронтальной и вихревой динамики в арктических морях в условиях меняющегося климата».
- Грант РНФ № 23–17–20010 (2023–2025) «Оценка влияния внешней биогенной нагрузки на функционирование экосистемы Ладожского озера в условиях меняющегося климата по результатам трехмерного математического моделирования».
- Грант РНФ № 23–17–00174 (2023–2025) «Исследование гидрофизических процессов, обусловленных приливом, на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам, и их влияния на ранние стадии развития минтая».

Выполнена оценка качества спутниковых данных и данных реанализов/прогнозов для регистрации фронтальных зон в Норвежском, Баренцевом и Карском морях [41–50]

Широко известно, что в настоящее время существует ряд модельных и спутниковых продуктов, содержащих термохалинные характеристики вод на глобальных и региональных масштабах. Они доступны в свободном доступе, что расширяет возможности исследования особенностей гидрологической структуры морей и океанов. Однако одни и те же глобальные модели могут с разной точностью воспроизводить гидрологические поля в различных акваториях Мирового океана. Поэтому возникает задача оценки качества доступных данных с целью выбора оптимального продукта для последующего использования в оценке изменчивости характеристик фронтальных зон в условиях современного меняющегося климата.

Для оценки качества данных в районах фронтальных зон Норвежского, Баренцева и Карского морей в целом использовались данные только о температуре GHRSSST OSTIA, MODIS/Aqua и VIIRS/Suomi NPP, только по солености — NASA/SMAP и о температуре и солености — CMEMS GLORYS12V1, MERCATOR PSY4QV3R1 в разные периоды времени. Также привлекались данные *in situ*. Валидация данных выполнялась на основе метода, ранее разработанного сотрудниками лаборатории.

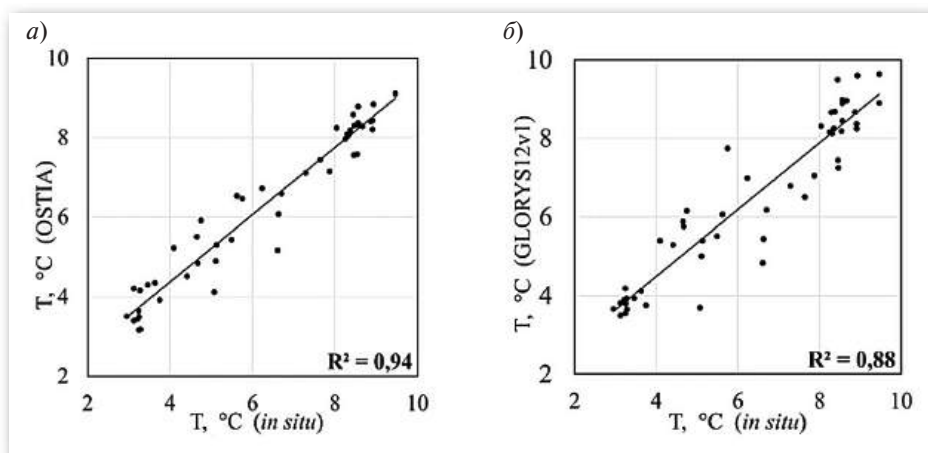


Рис. 4.1. Результаты расчета линейной регрессии между *in situ* измерениями и композитными данными:

a — *in situ*/GHRSSST OSTIA; *б* — *in situ*/CMEMS GLORYS12v1. R^2 — коэффициент детерминации

Для Норвежского моря было получено, что в анализируемых данных по температуре за май 2011–2020 гг. регистрируются все поверхностные проявления основных фронтальных зон, за исключением Исландской Прибрежной. Также была проведена валидация данных температуры поверхности по данным реанализов с *in situ* наблюдениями в районе Исландско-Фарерской фронтальной зоны. Показано высокое соответствие данных друг другу (рис. 4.1), и сделан вывод, о том, что для анализа фронтальных зон на поверхности Норвежского моря наиболее предпочтительно использование полей температуры GHRSSST OSTIA.

Для Баренцева моря производилась оценка качества воспроизводимости градиентов температуры и солёности в летний период 1993–2022 гг. По используемым данным значение фонового горизонтального градиента температуры за три десятилетия увеличивается. Разница между рассчитанными оценками горизонтального градиента температуры по спутниковым данным и данным реанализа может составлять более $0,01$ °C/км, что сопоставимо с величиной среднего климатического градиента в Баренцевом море. Наиболее близки к этой оценке значения градиента температуры, полученные по данным CMEMS GLORYS12V1 и MERCATOR PSY4QV3R1, что позволяет отнести указанные океанологические базы к массиву данных, как к наиболее предпочтительному для анализа поверхностных проявлений фронтальных зон в Баренцевом море.

Для Карского моря была произведена оценка качества данных по солёности NASA/SMAP вблизи плюма Оби-Енисея. Качественный анализ показал, что данные SMAP хорошо воспроизводят значения солёности в Карском море вне пределов плюма Оби-Енисея, а также в области больших градиентов

солености на внешней границе плюма стоковой фронтальной зоны, где средние значения варьируют в пределах 18–25 PSU (при сравнении с данными *in situ*). Количественный анализ (валидация) показал, что радиометр NASA/SMAP с высокой точностью описывает поля солености на поверхности в районе стоковой фронтальной зоны в августе и с недостаточной — в октябре (рис. 4.2). Это позволяет сделать вывод о возможности их применения для анализа характеристик поверхностных вод и выделения фронтальной зоны только в наиболее теплый период летнего сезона.

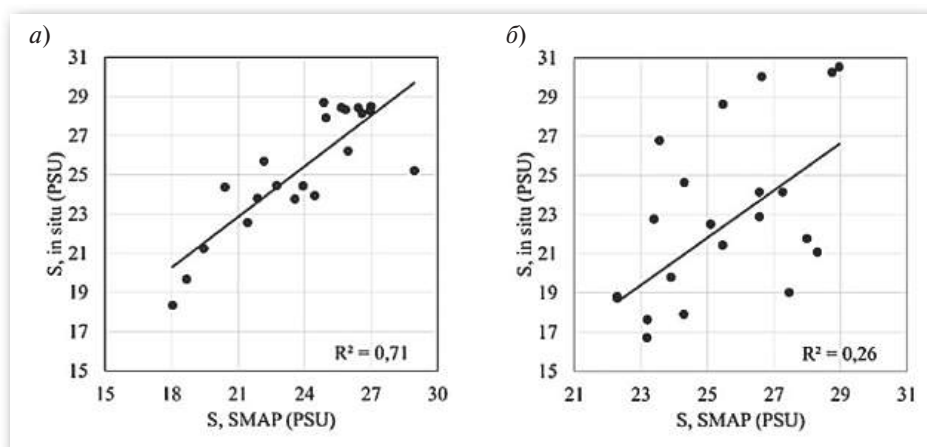


Рис. 4.2. Результаты расчета линейной регрессии спутниковых и *in situ* измерений солености:

а — август; б — октябрь; R2 — коэффициент детерминации

Полученные результаты позволили выбрать продукты, оптимальные для описания физико-географических характеристик фронтальных зон на акватории Норвежского, Баренцева и Карского морей.

Получены характеристики прикромочной (арктической) фронтальной зоны на основе спутниковых и *in situ* данных [44, 49, 50]

Арктический ледяной покров является важнейшей частью гидрологического режима всего Северного Ледовитого океана. В последние десятилетия в арктическом регионе наблюдается интенсивное отступление кромки ледяного покрова к северному полюсу. На границе однолетнего льда и полностью открытых морских вод формируется уникальная по своей гидрологической структуре прикромочная (арктическая) фронтальная зона (ПФЗ) сведения, о которой носят отрывочный характер.

Для определения горизонтальных характеристик ПФЗ на поверхности Баренцева и Карского морей использовались данные о температуре поверхности моря (ТПМ) MODIS Aqua и Suomi NPP VIIRS с августа по сентябрь

с 2002 по 2020 гг. Характеристики определялись на основе иерархического и интерактивного алгоритмов кластерного анализа. Для определения вертикальных характеристик фронтальной зоны на акватории Баренцева моря был проанализирован массив данных *in situ*, полученных методом СТД-профилирования.

В целом многолетний градиент температуры на поверхности Баренцева и Карского морей во фронтальной зоне составил $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, а площадь — 348 тыс. км². Межгодовые колебания градиента температуры составили от $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ до $0,09\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$, а площади прикромочной фронтальной зоны — от 159 до 489 тыс. км². Поверхностная температура прикромочной фронтальной зоны на фоне таяния льдов в последнее десятилетие стремительно растет, при этом поверхностный градиент температуры остается стабильным. Площадь ПФЗ в целом соотносится с параметрами площади и сплоченности льдов. Анализ пространственного положения ПФЗ (рис. 4.3) на поверхности Баренцева и Карского морей показал, что в последние годы фронтальная зона значительно смещается на север в область открытых вод Северного Ледовитого океана и регистрируется в летний период в Баренцевом и Карском морях только в августе. Установлено наличие корреляционной связи параметров ПФЗ с величиной площади, сплоченности льдов, а также индексов атмосферной циркуляции Североатлантического колебания.

Анализ *in situ* данных, произведенных в апреле-мае 2023 г. в районе ПФЗ в Баренцевом море, позволил выявить на всех четырех вертикальных разрезах высокоградиентные зоны между водами арктического происхождения с пониженной температурой и соленостью, и трансформированными атлантическими водами. Фронтальные зоны были хорошо выражены в полях температуры солености, кроме того, вблизи этих областей наблюдались максимумы в распределении *хлорофилла-а*. В качестве примера на рис. 4.4. результаты измерений на разрезе вдоль $33^{\circ}30'$ в. д., где довольно четко прослеживается прикромочная фронтальная зона по глубине.

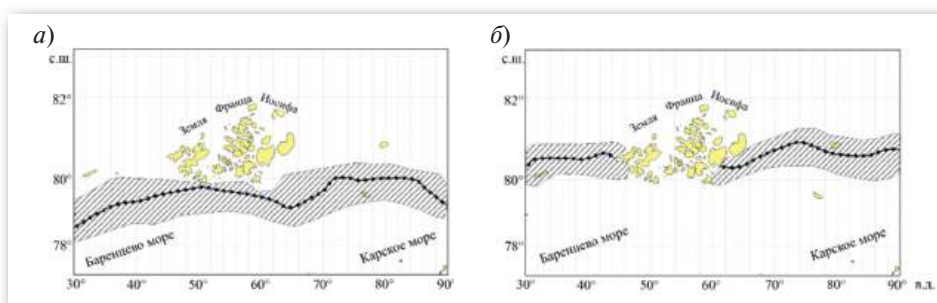


Рис. 4.3. Многолетние положения АФЗ (область штрих-линий):

а — август; б — сентябрь. Черной линией указано положение кромки ледяного покрова (сплоченность льда 1% по данным радиометров AMSR-E и AMSR-2)

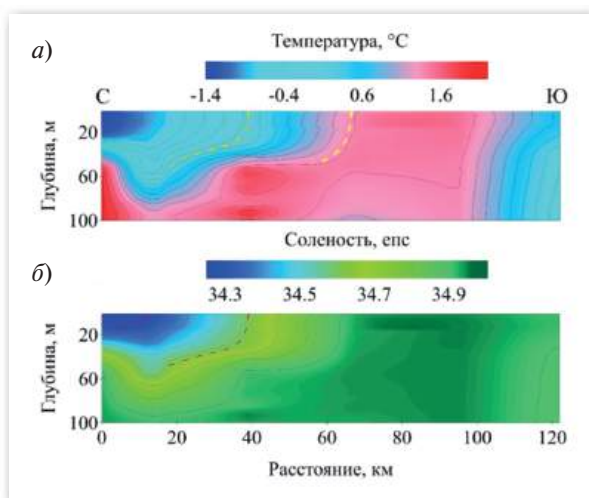


Рис. 4.4. Вертикальное распределение температуры (а) и солености (б) на прикромочном разрезе вдоль $33^{\circ}30'$ в. д. Пунктирными линиями обозначены границы области повышенных горизонтальных градиентов (27 апреля 2023 г.)

В целом по результатам анализа натуральных данных было установлено, что максимальные градиенты температуры и солености в области ПФЗ весной 2023 г. достигали $0.07^{\circ}\text{C}/\text{км}$ и $0.08\text{ eps}/\text{км}$, соответственно, что существенно ниже средних оценок, полученных в XX в. Ширина ПФЗ также стала меньше.

Стоит отметить, что так как ПФЗ является важным элементом, поддерживающим перераспределение потоков тепла в условиях отмечаемой атлантификации Баренцева моря, требуется проведение ее исследований в разные сезоны для оценки масштабности происходящих изменений.

Выявлены особенности вихревой динамики на акваториях арктических и дальневосточных морей [48, 51–56]

Малые вихревые структуры, включая субмезомасштабные вихри размером менее 5 км, играют ключевую роль в вертикальном и горизонтальном переносе тепла, солей и взвешенных веществ благодаря значительным вертикальным скоростям. Кроме того, их влияние может также оказывать влияние на перераспределение дрейфующего льда в прикромочных ледовых зонах. Ввиду их небольших размеров (от сотен метров до десятка километров) и времени существования (от нескольких часов до нескольких суток) наилучшим методом их изучения является анализ спутниковых данных высокого разрешения.

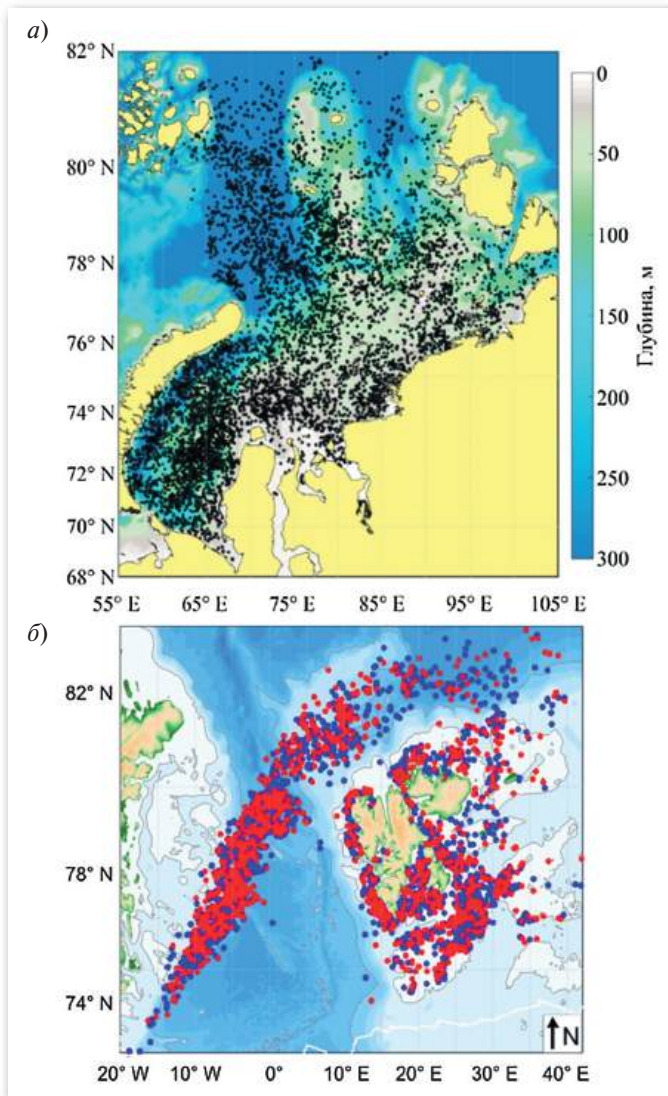


Рис. 4.5. Положение центров зарегистрированных вихрей открытой воды в Карском море за август 2015–2021 гг. (а) и вихрей прикромочной зоны в проливе Фрама и вблизи архипелага Шпицберген с января по апрель 2018 г. (б)
 Черные кружки — все вихри, синие (красные) кружки — циклонические (антициклонические) вихри.
 Серые линии — изобаты 500 и 2000 м

Для развития представлений о субмезомасштабной пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей, связанной с вихревой динамикой, а также анализа их особенностей в арктических и дальневосточных морях выполнен анализ значительного количества радиолокационных изображений.

В качестве исходных данных использовались около 5100 спутниковых радиолокационных изображений Sentinel-1 A/B.

В Карском море за августы 2015–2021 гг. было зарегистрировано более 6700 проявлений вихрей открытой воды со средним диаметром 2,9 км (рис. 4.5а). Выявлено, что основными районами встречаемости являются области в юго-западной и центральной частях Карского моря, над свалами глубин западнее и северо-западнее п-ва Ямал, в области стоковой фронтальной зоны и вблизи устьев рек Оби и Енисея. Показано, что генерация вихрей в этих районах может быть связана с интенсификацией бароклинной неустойчивости в поверхностном слое, а также с постоянно существующим механизмом генерации вихрей в Карском море за счет обтекания приливным течением топографических неоднородностей.

Также в арктическом регионе были исследованы особенности вихрей прикромочной зоны в проливе Фрама и вблизи арх. Шпицберген в январе-апреле 2018 г. Всего было зарегистрировано 4220 проявлений (рис. 4.5б). Средние диаметры вихрей составили около 3 км на мелководье и 5–7,5 км на глубокой воде. Чаще всего вихри прикромочной зоны регистрировались в районах с низкой сплоченностью льда (<20%). Районами частой встречаемости вихрей были шельф Гренландского моря, а также область вблизи острова Надежды на Шпицбергенской банке. Показано, что вихри в этих районах

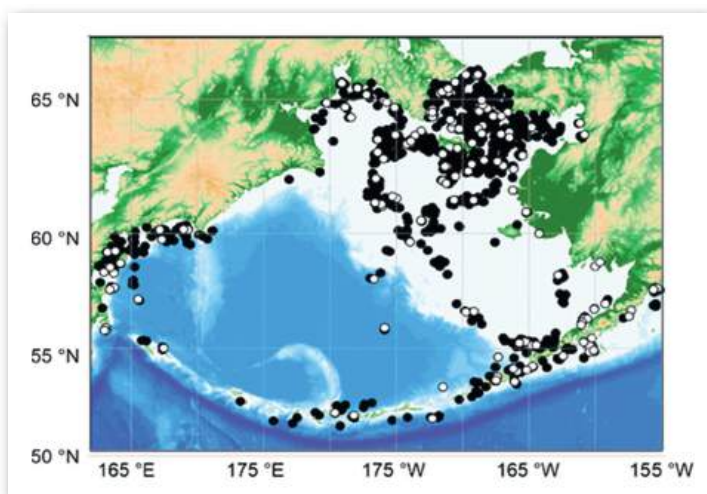


Рис. 4.6. Пространственное распределение центров вихрей за лето 2020 г., черные круги — вихри циклонического типа вращения, белые — антициклонического типа вращения

генерируются из-за неустойчивости сдвигового течения при взаимодействии с ледовой кромкой, а также при прохождении потоком препятствия. Также было рассчитано среднее горизонтальное отступление кромки льда за счет вихрей при-кромочной зоны: в зависимости от района оно варьировало от 0,1 до 2 км/сут.

В Беринговом море по данным за лето 2020 г. было зарегистрировано 1018 вихревых структур со средним диаметром около 2,5 км. При этом проявления регистрировались в областях скоростей ветра до 4 м/с. Чаще всего вихри в Беринговом море регистрировались в северной мелководной части (рис. 4.6), где причиной генерации может быть локальный сдвиг течений, например, под воздействием разнонаправленных потоков.

В результате установлено, что субмезомасштабные вихревые структуры — распространенное явление на акватории арктических и дальневосточных морей. Показаны особенности их пространственно-временной изменчивости на рассматриваемых акваториях: получены характерные размеры вихрей; установлены периоды и районы их наибольшей встречаемости; показана связь с сезонной изменчивостью пикноклина, фронтальной динамикой, а также интенсивностью приливных процессов в районах неровностей дна.

Выполнены оценки особенностей короткопериодных внутренних волн в шельфовых областях с выраженной приливной динамикой на примере Баренцева моря и Курило-Камчатского региона Тихого океана [57–64]

Короткопериодные внутренние волны (КВВ) играют важную роль в вертикальном перемешивании и влияют на морские экосистемы. Их изучение особенно актуально в Арктике, где климатические изменения усиливают волновую активность. В Баренцевом море и у Курило-Камчатского региона КВВ связаны с приливами и рельефом дна, но их сезонная изменчивость и механизмы формирования изучены слабо. Поэтому возникает необходимость сравнительного анализа характеристик внутренних волн и механизмов генерации в шельфовых районах с интенсивной приливной динамикой с применением спутниковых и контактных измерений.

Для регистрации проявлений КВВ на акваториях Баренцева моря и Курило-Камчатского региона в качестве исходных данных использовались около 4,5 тыс. спутниковых изображений Sentinel 1, Alos PALSAR, Sentinel 2, Landsat 8, Suomi NPP, Aqua/Terra MODIS, данные реанализа Copernicus и глобального приливного атласа TPXO9, а также *in situ* наблюдения.

В рамках подспутниковых экспериментов с применением вейвлет- и модового анализа выявлено в южной части Баренцева моря и Авачинском заливе Тихого океана КВВ первой моды с амплитудой свыше 2,5 м при глубине пикноклина около 15 м. По результатам анализа спутниковых данных установлены районы регулярного возникновения волн и их внутригодовая изменчивость: в Баренцевом море (рис. 4.7а) активность наблюдается с июня по сентябрь с пиком в начале августа и минимумами в июне и сентябре,

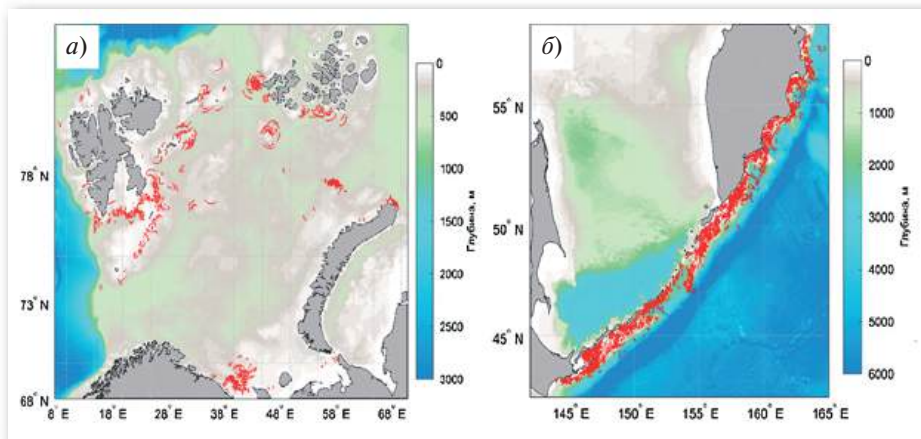


Рис. 4.7. Пространственное положение лидирующих гребней проявлений КВВ за весь исследуемый период:

а — Баренцево море, б — Курило-Камчатский регион Тихого океана

а в Курило-Камчатском регионе (рис. 4.7б) высокая частота проявлений у острова Кунашир, над Хребтом Витязь и в других зонах сохраняется почти круглогодично, достигая максимума в июле и минимума в феврале.

Преобладающие механизмы генерации различаются: в Баренцевом море (у мыса Святой Нос) доминирует запрепятственный механизм при обтекании приливным потоком донных неоднородностей, а в Авачинском заливе вероятно дезинтеграция внутренних приливных волн в пакеты короткопериодных внутренних волн.

Согласно критерию tidal body force, положение «горячих точек» короткопериодных внутренних волн коррелирует с очагами генерации приливных, на которые приходится от 25% (июнь) до 64% (сентябрь) проявлений в Баренцевом море и от 26% (март) до 70% (август) — в Курило-Камчатском регионе. В последнем также выявлена значительная роль мезомасштабной вихревой динамики, связанной с неустойчивостью Курило-Камчатского течения: в районе от м. Лопатка до м. Опасный 70% проявлений короткопериодных внутренних волн приурочены к вихревым структурам.

Создана оперативно разворачиваемая система мониторинга субмезомасштабной изменчивости процессов в природных водоемах, обеспечивающая непрерывный сбор данных в труднодоступных акваториях [64]

Мониторинг короткопериодной и субмезомасштабной изменчивости характеристик гидрологических полей океана важен для изучения их вклада в диссипативные процессы на шельфе различных акваторий. Основная

сложность заключается в получении высокоразрешающих измерений одновременно по пространству и времени. Для локальных акваторий эту задачу можно решить с помощью кластеров заякоренных термокос или интегральных датчиков, но их установка и обслуживание связаны с трудностями и рисками. Это обуславливает необходимость использования автономных дрейфующих буев, которые только начинают применяться для регистрации характеристик внутренних волн.

В связи с этим была разработана система, которая построена на основе свободно дрейфующих поверхностных термопрофилирующих буев и станции автоматического приема информации. Каждый из буев имеет измерительную линию с восемнадцатью датчиками температуры и датчиком гидростатического давления, приемник глобального позиционирования, систему сбора данных и спутниковый модем для передачи данных. Приемная станция состоит из блока приема информации, антенн спутниковой связи и системы глобального позиционирования, персонального компьютера со специализированным программным обеспечением. На рис. 4.8 представлена схема составных частей гидрофизической измерительной системы «Волна-ДС-01». Кроме того, создана методика оценки характеристик КВВ на основе данных наблюдений автономной гидрофизической системы, суть которой сводится к определению задержки между прибытиями цуга волн на разные буй по локальным максимумам скользящей дисперсии на глубине залегания пикноклина.

По результатам применения дрейфующей системы «Волна-ДС 01» в 2024 г. собрана обширная база измерений в арктических морях России. Полученные

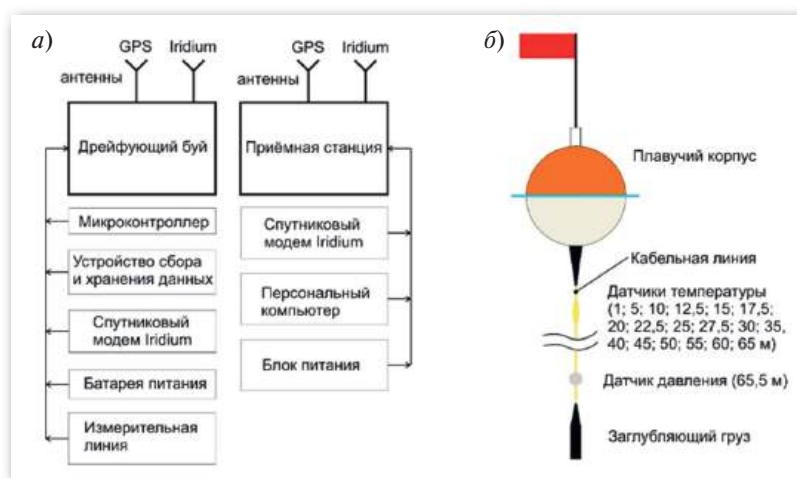


Рис. 4.8. Принцип работы гидрофизической измерительной системы «Волна-ДС-01»:

- а — схема составных частей (дрейфующий буй «Волна-ДБ-01» и приемная станция «Волна-ПС-01»);
 б — принципиальная схема дрейфующего буя

результаты в совокупности со спутниковыми наблюдениями и расчетами по региональной приливной модели высокого разрешения позволят в будущем оценить возможные экстремальные амплитуды внутренних волн и преобладающие механизмы генерации КВВ на ключевых участках трассы Северного Морского пути.

Изучение условий стабильности и разложения газовых гидратов в пористых осадках при отрицательной по Цельсию температуре [65]

Скопления гидратов метана в пористых осадках залегают под дном многих морей. Гидраты метана формируются и существуют при определенных термобарических условиях и даже незначительные изменения этих условий могут нарушить их стабильность, что приведет к разложению гидратов на воду и метан-газ. Существует гипотеза, что повышение температуры океана и/или снижение его уровня могут запустить внезапный выход метана из гидратов, залегающих под дном моря. Учитывая парниковые свойства метана, это может способствовать дальнейшему повышению температуры Земли и дестабилизации гидратов, создавая положительную обратную связь, которая ведет к росту неустойчивости теплового режима в среде. В условиях мелких арктических морей эта неустойчивость может проявиться достаточно быстро, вызывая разложение гидратов криолитозоны. Цель исследования — изучить процессы фазового превращения газовых гидратов в пористых осадках при отрицательных температурах по Цельсию.

Для достижения поставленной цели используется метод моделирования термобарического режима газоизолированной сферической каверны в условиях фазового разложения содержащегося в ней гидрата метана.

На рис. 4.9 показано, что смещение фазовой границы быстро уменьшается при возрастании гидратонасыщенности и/или снижении исходной проницаемости, ведущих к затруднению ухода свободного газа из области диссоциации гидрата и, тем самым, — к повышению его давления и росту равновесной температуры. Масса гидрата, находившаяся в этой тонкой оболочке, невелика, а поэтому мала и тепловая энергия, затраченная на его разложение. Несмотря на то, что здесь рассмотрен случай гидратонасыщенной сферической каверны в массиве поддонного или подземного льда, можно ожидать, что полученные результаты будут справедливыми и для других гидратсодержащих тел (с учетом их размеров и условий прогрева), заключенных в газонепроницаемую ледяную оболочку, способную выдерживать возникающие в ней напряжения при разложении гидрата метана.

Таким образом, чем больше содержится гидрата метана внутри газонепроницаемой неоднородности до нагрева и чем меньше проницаемость этой среды для газа, тем большее количество гидрата останется в первичном,

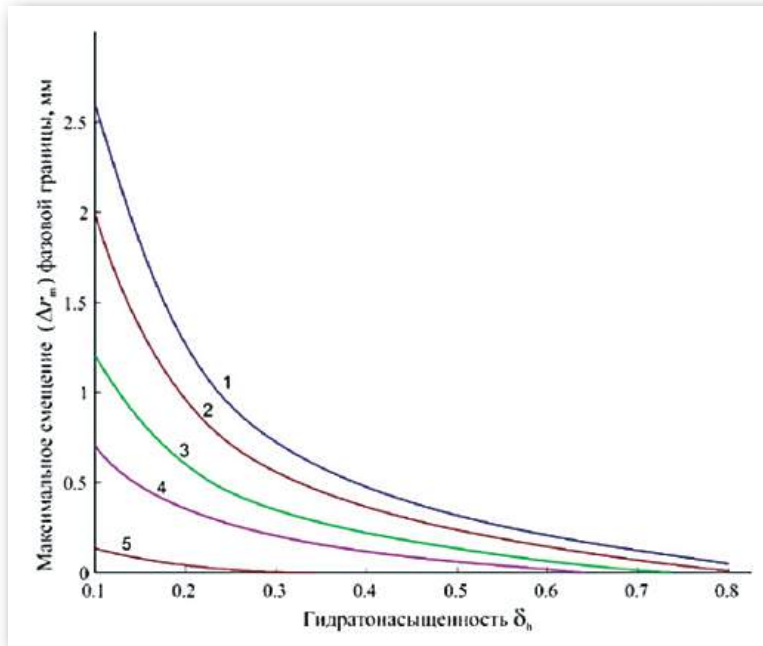


Рис. 4.9. Зависимость максимального смещения фазовой границы относительно поверхности сферы от гидратонасыщенности среды и ее проницаемости. Индексы кривых — номера ($n = 1-5$) проницаемостей в списке: $\kappa_0 = [100, 30, 10, 5, 1] \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$

не затронутым разложением состоянии даже после значительного повышения температуры на поверхности неоднородности. Давление, повышающееся при фазовом разложении гидрата, обеспечивает условия стабильности гидрата, способствуя их «самоконсервации» при условии, что прочность окружающей каверну ледяной оболочки достаточна, чтобы выдерживать это давление.

Научное сотрудничество

Сотрудники лаборатории принимают активное участие в развитии научных связей. За последние годы сделан целый ряд докладов на таких научных конференциях как «Морские берега», «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации», «Комплексные исследования морей России», «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», «Современные проблемы оптики естественных вод», «Итоги экспедиционных исследований в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген», «Оценка состояния ресурсов, экосистем озер и морей в условиях современных изменений климата и социо-экономического развития», «Морские исследования и образование — MARESEDU», «Моря России».

Сотрудники лаборатории участвовали в морских экспедиционных исследованиях совместно с коллегами из Мурманского морского биологического института РАН (г. Мурманск), Морского гидрофизического института РАН (г. Севастополь), Камчатского филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (г. Петропавловск Камчатский), Института мирового океана Дальневосточного федерального университета (г. Владивосток), Института биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (г. Севастополь).

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ГИДРОФИЗИКИ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВИХРЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

5.1. ЦЕНТР ПРИКЛАДНЫХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Центр прикладных гидрофизических исследований (ЦПГФИ) был создан 1 марта 2022 г. по инициативе директора Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук заслуженного деятеля науки Российской Федерации, д. т. н., профессора Родионова А. А. Создание ЦПГФИ как отдельного научного подразделения в составе филиала было обусловлено большой прикладной значимостью результатов цикла поисковых работ, выполненных филиалом по заказу Фонда перспективных исследований и Секцией по оборонным проблемам при президиуме РАН. В рамках этих работ был сформирован коллектив ученых и разработаны предложения по перспективным направлениям развития теоретических и экспериментальных исследований в области прикладной гидрофизики.

Начальником центра был назначен к. т. н. Мальков С. А., имеющий опыт выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по гидрофизическому направлению. В научный состав Центра вошли: д. ф. - м. н. Т. А. Хантулева, к. т. н. В. А. Сергеев, к. т. н. В. В. Черницкий, к. т. н. В. В. Коваленко, к. т. н. М. Л. Сбитной, к. т. н. П. В. Дорохов, к. т. н. Р. Ю. Монахов, к. в. н. С. П. Демин, к. т. н. В. Л. Дерновский, Н. Ф. Калашников, Г. В. Жегулин, А. Н. Шиптенко, В. С. Лебанин и др.

- Деятельность ЦПГФИ направлена на выполнение фундаментальных, поисковых и прикладных исследований по направлениям:
 - взаимодействия физических полей морских объектов, океана и атмосферы;
 - разработки и применения новых методов и средств регистрации физических полей океана и морских объектов;
 - применения современных информационных технологий в задачах прикладной гидрофизики, проектирования и эксплуатации морских объектов;
 - применения методов гидробионики в задачах прикладной гидрофизики.
- Важной задачей ЦПГФИ в рамках проводимых исследований является разработка и формирование предложений:
 - по внедрению результатов гидрофизических исследований и разработок в экономических, экологических, оборонных и других сферах деятельности;

- по постановке новых НИОКР в области прикладных гидрофизических исследований.
- За короткий срок сотрудниками ЦПГФИ созданы научные продукты в области прикладной гидрофизики, к которым можно отнести:
 - цифровую термогидродинамическую модель обтекания подводных стационарных и подвижных объектов с учетом нестационарных течений, возникающих за счет генерации крупномасштабных вихревых структур;
 - методы и алгоритмы обработки данных дистанционного зондирования океана с помощью радиолокационных, оптико-электронных и лидарных средств и контактных измерений гидрофизических параметров в толще морской среды для решения прикладных задач в народнохозяйственной и оборонной сфере;
 - комплекс программных средств для моделирования процессов функционирования гидроакустических систем в различных гидрофизических условиях. В комплексе реализованы методы обработки гидроакустических сигналов, согласованные с морской средой. Проведены модельные исследования, позволяющие оценить требования к оперативной океанографии. Ниже более подробно приведены результаты гидроакустических исследований.

Исследование методов согласованной со средой обработки гидроакустических сигналов

Более 50 лет прошло с момента появления первых публикаций, посвященных согласованной с полем (или со средой) (ССО) обработке гидроакустических (ГА) сигналов (в англоязычной литературе — *matched field processing (MFP)*) [66, 67], но интерес к этой проблеме не ослабевает. Это связано, прежде всего, с теми потенциальными преимуществами, которыми обладает ССО по сравнению с традиционными методами обработки ГА сигналов, заключающимися в повышении помехоустойчивости (дальности действия) и в возможности локализации удаленных источников по глубине и дистанции. Однако, как показали многочисленные исследования, методы ССО обладают высокой чувствительностью к ошибкам параметров модели гидроакустического канала, которая используется для их реализации, в результате чего указанные выше преимущества ССО оказываются не достижимыми в условиях реального океана. С одной стороны, необходимо разрабатывать робастные алгоритмы ССО, обладающие высокой устойчивостью к ошибкам параметров морской среды, и определять требования по объему и качеству оперативной информации о реальной морской среде, необходимой для их эффективного функционирования. С другой стороны, необходимо создать систему оперативной океанографии (СОО), обеспечивающую эффективное функционирование ССО на основе данных о текущем состоянии морской

среды. Ключевым вопросом, определяющим возможность практической реализации ССО, является количественная оценка влияния ошибок параметров морской среды на эффективность гидроакустических средств (ГАС), использующих методы ССО.

Аналитические и экспериментальные методы не позволяют дать достаточно полный ответ на поставленный вопрос: аналитические методы ограничены только простейшими гидролого-акустическими условиями (ГАУ), в то время как при проведении экспериментальных исследований не удается достаточно точно и оперативно контролировать параметры волновода. Поэтому единственным подходом, в рамках которого можно количественно оценить эффективность алгоритмов ССО в реальных ГАУ с учетом неточного знания параметров морской среды, является компьютерное имитационное моделирование на основе реалистичной численной модели среды распространения принимаемых сигналов.

В СПбФ ИО РАН разработана комплексная компьютерная модель, а на ее основе создан макет программно-аппаратного комплекса (ПАК), позволяющий лучевыми и волновыми методами расчета гидроакустических полей осуществлять имитационное моделирование процессов функционирования ГАС, использующих традиционные алгоритмы и алгоритмы ССО как при условии точного согласования со средой, так и при заданных уровнях погрешностей данных о текущих параметрах морской среды, поступающих от СОО. На рис. 5.1 представлена структура комплексной модели исследования алгоритмов ССО, а на рис. 5.2 приведены основные функциональные блоки макета ПАК.

На рис. 5.3 приведены результаты расчета гидроакустического поля в условиях глубоководного района, а на рис. 5.4 — результаты моделирования обработки сигналов широкополосного источника. Для выделения места локализации источника пространство волновода разбивается на ячейки разрешения по глубине с дискретностью 4 м и расстоянию до антенны с дискретностью 50 м, затем для каждой ячейки определяются изменения сигналов источника для каждого гидрофона. В соответствии с полученной передаточной функцией среды производятся преобразования принятых сигналов, их суммирование по всем лучам и по всем гидрофонам для каждой ячейки разрешения. Далее определяются дисперсии полученных сигналов для каждой ячейки. Ячейка, в которой дисперсия или среднее квадратическое отклонение является максимальным, представляет собой место локализации источника звука. Для представленного варианта расстояние от антенны ГАС до источника 32 км, глубина источника 200 м. В процессе имитационного моделирования получены реалистичные оценки влияния априорной неопределенности морской среды на выходные характеристики алгоритмов ССО для различных типов приемных антенн. Дальнейшее совершенствование разработанной модели должно быть направлено на реализацию робастных алгоритмов, обладающих повышенной устойчивостью к ошибкам параметров ГА канала.

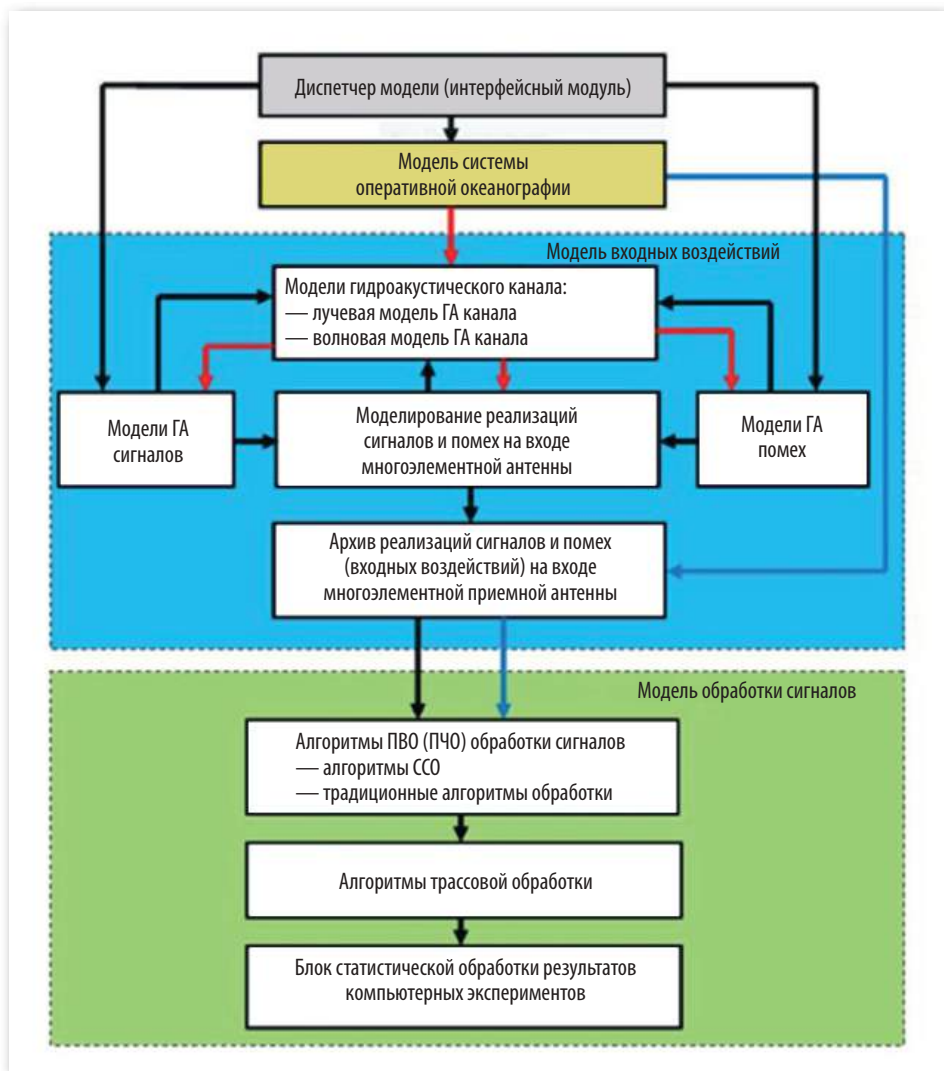


Рис. 5.1. Структура комплексной модели исследования алгоритмов ССО

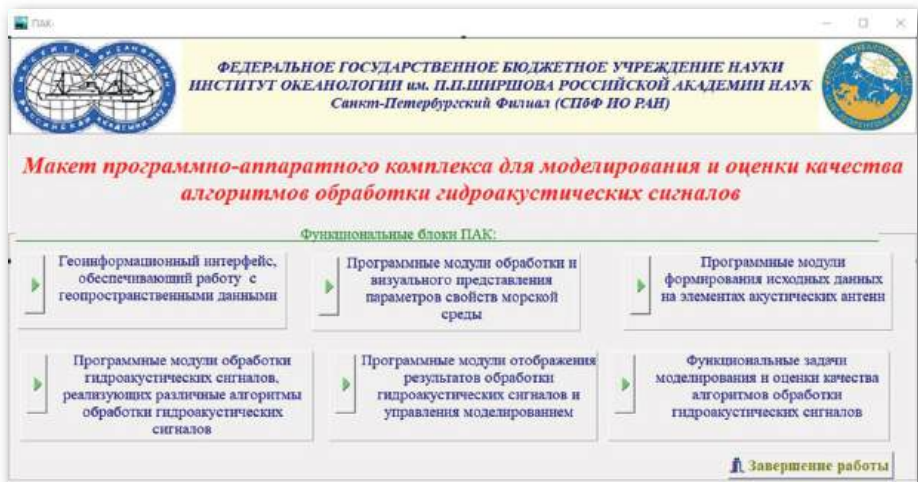


Рис. 5.2. Функциональные блоки ПАК

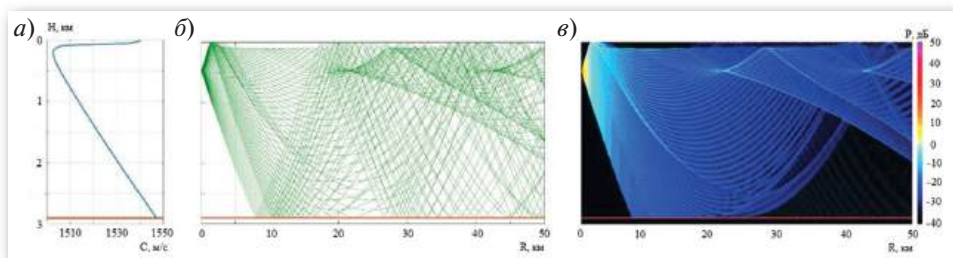


Рис. 5.3. Формирование акустического поля в волноводе:
 а — ВРСЗ в районе; б — лучевая картина; в — акустическое поле в волноводе

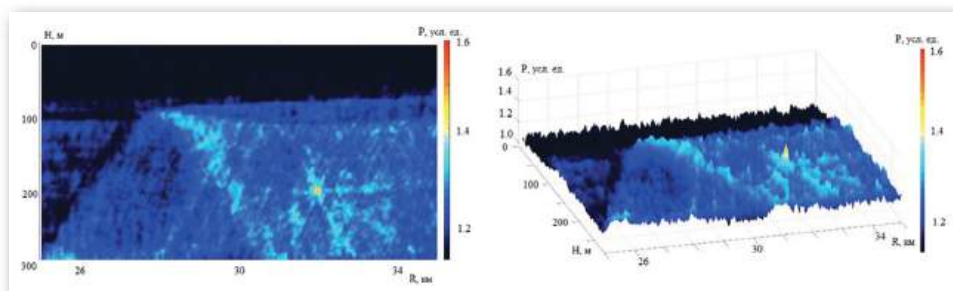


Рис. 5.4. Результаты согласованной со средней обработки сигналов источника звука

Алгоритм локализации движущегося подводного источника широкополосного шума на основе его пространственно-скоростных портретов в частотной области

При проведении натуральных экспериментов довольно часто возникает задача локализации движущегося подводного источника широкополосного шума с целью оценки результатов экспериментов. Эта задача может быть решена путем обработки сигналов от одиночного гидрофона, размещенного в районе проведения экспериментов. При движении источника широкополосного шума в мелком море происходят многократные отражения излучаемых им сигналов от дна и поверхности, вследствие чего в пространстве формируется устойчивая интерференционная частотно-временная структура сигнала, перемещающаяся вместе с источником [68].

На рис. 5.5 представлены спектрограммы амплитуд гидроакустических сигналов от источника, движущегося со скоростью: а) 3 м/с на кратчайшем расстоянии от гидрофона 2 км; б) 5 м/с на кратчайшем расстоянии от гидрофона 1,4 км.

Они представляют собой пространственно-скоростные портреты источника шума в частотной области для выбранных условий. В зависимости от глубины моря, глубин источника и приемника, скорости источника, кратчайшего расстояния между источником и приемником условия суммирования сигналов будут различными и пространственно-скоростные портреты источника шума для них будут уникальными.

Идея локализации источника шума заключается в том, что необходимо сформировать набор портретов и сравнить их со спектрограммой принятого сигнала. Если участок спектрограммы совпадает с каким-либо портретом, то можно предположить, что параметры движения источника соответствуют параметрам, по которым сформирован этот портрет. Проведено моделирование движения источника шума для различных глубин, скоростей движения и кратчайших расстояний до приемника при воздействии шумовых помех различного уровня. В качестве иллюстраций ниже представлены результаты

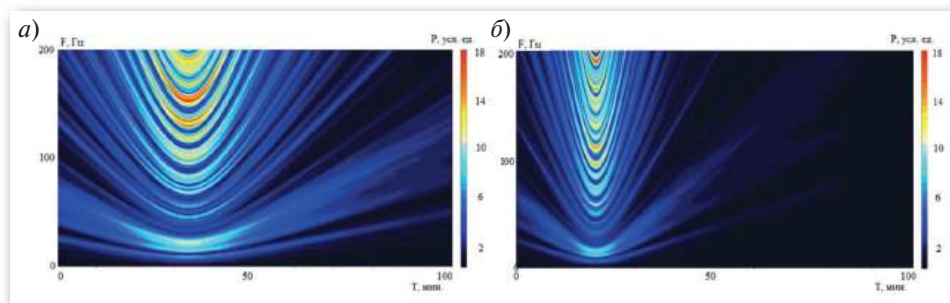


Рис. 5.5. Спектрограммы амплитуд гидроакустических сигналов источника шума

обработки сигналов шумового источника, движущегося на глубине 70 м со скоростью 3 м/с на кратчайшем расстоянии от приемника 2 км.

На рис. 5.6 показаны величины эффектов на выходе набора фильтров по глубинам 7, 70 и 100 м; по скорости от 2 до 5 м/с; по кратчайшему расстоянию от 0,2 до 4 км.

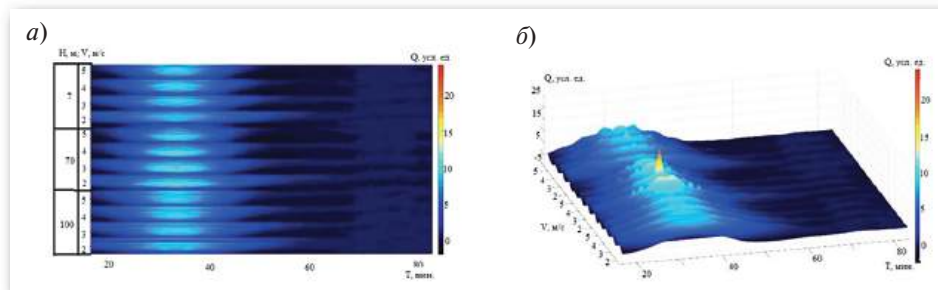


Рис. 5.6. Величины эффектов на выходе набора фильтров по глубине, скорости и кратчайшему расстоянию:

а — вид сверху; б — изометрическая проекция

В фильтре, соответствующем глубине 70 м и скорости 3 м/с, в момент времени 33 мин наблюдается четкий максимум, что полностью совпадает с параметрами движения источника, заданными при моделировании.

Результаты моделирования показали, что разработанный метод локализации подводного источника широкополосного шума на основе его пространственно-скоростных портретов в частотной области позволяет осуществлять локализацию источника при воздействии помех такого уровня, при котором на спектрограмме источник уже не виден, а на «кривой прохода» наблюдается лишь при стационарной помехе.

Исследование параметров внутренних волн на основе моделирования методов просветной гидроакустики

Дистанционные методы значительно ускоряют проведение исследований гидродинамических явлений, происходящих в толще морской среды и влияющих на процессы обмена в океане. Актуальной является оценка характеристик внутренних волн (ВВ) просветным гидроакустическим методом. Его сущность состоит в приеме и анализе излученных гидроакустических сигналов, прошедших через область пространства, в котором движутся ВВ [69]. Он позволяет зарегистрировать волну и оценить ее период. Вместе с тем научный интерес представляет возможность оценки направления, длины и амплитуды ВВ. Моделирование осуществлялось путем формирования в волноводе двумерного распределения скорости звука, изменяющегося во времени в соответствии с распространяющейся ВВ. Зависимости плотности и скорости

звука (ВРСЗ) от глубины получены по результатам измерений температуры и солености в реальных условиях [70] и скорректированы для получения плавных кривых. В волноводе распространяется цуг внутренних волн; длина волны в цуге составляет 300 м, а в направлении, перпендикулярном к направлению распространения — 2000 м; ее скорость, рассчитанная по методике [71], равна 0,52 м/с; амплитуда на глубине пикноклина — 5 м; численный расчет зависимости амплитуды от глубины проведен по методике [72]. Передний и задний фронты огибающей внутренней волны подчиняется зависимости вида:

$$A = e^{-\left(\frac{x}{M} - \sqrt{-\ln \frac{1}{2}}\right)^2} \Big|_{x \leq 0}, \quad A = 1 - e^{-\left(\frac{x}{M} + \sqrt{-\ln \frac{1}{2}}\right)^2} \Big|_{x \geq 0},$$

где M — масштабирующий коэффициент.

Плоская ВВ в волноводе описывается выражением:

$$\xi_{xyz} = A_{xyz} \sin \frac{2\pi}{\lambda} x,$$

где A_{xyz} — трехмерная амплитуда ВВ, м; λ — длина ВВ в направлении ее распространения, м.

На рис. 5.7 приведены этапы моделирования: а) модель цуга ВВ, перемещающегося на глубине залегания пикноклина в направлении 30° относительно оси X ; показаны места расположения излучателя и одного из нескольких приемников и акустическая трасса, которую пересекает ВВ; б) модель волновода с ВВ, в котором показаны лучевая картина распространения сигналов от излучателя; в) двумерное распределение уровней гидроакустического поля, создаваемого излучателем в волноводе. В процессе моделирования произведены расчеты уровней полей для перемещения ВВ в направлениях: 0° , 30° , 60° , 90° .

На рис. 5.8 приведены вариации уровней гидроакустических полей в вертикальной и в горизонтальной плоскостях при прохождении внутренних волн через просветную трассу.

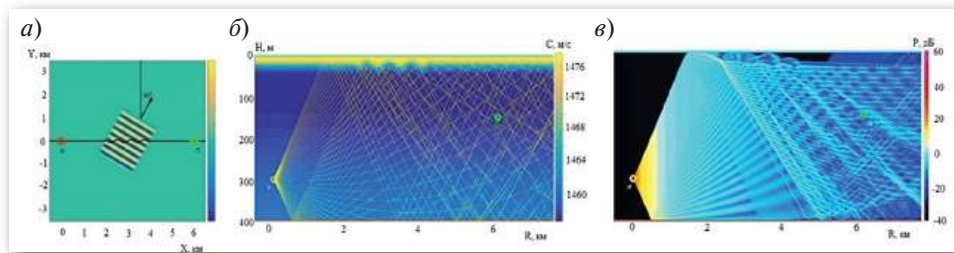


Рис. 5.7. Моделирование метода оценки параметров ВВ:

а — модель ВВ; б — волновод с ВВ и лучевая картина; в — гидроакустическое поле в волноводе

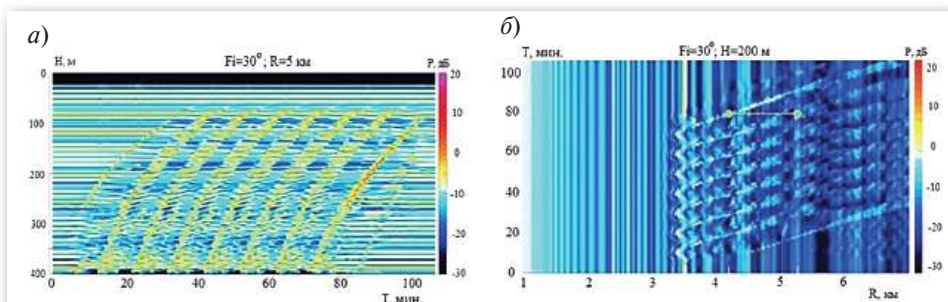


Рис. 5.8. Вариации уровней гидроакустических полей:
a — в вертикальной плоскости, *б* — в горизонтальной плоскости

Численное моделирование показало, что при наличии двух пересекающихся просветных трасс существует возможность определения просветным гидроакустическим методом параметров внутренней волны: длины волны и направления ее распространения с высокой точностью.

В рамках ЦПГФИ разрабатываются программа и методики комплексных натурных исследований мезо- и субмезомасштабных процессов в морской среде (рис. 5.9).

Большинство результатов научной деятельности, полученных сотрудниками ЦПГФИ, опубликовано в журнале РАН «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» и защищено патентами.

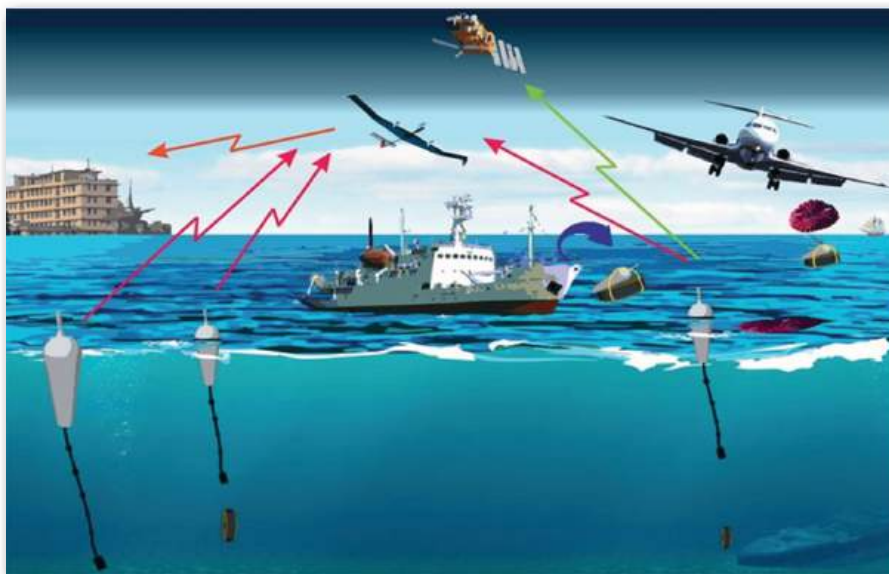


Рис. 5.9. Схема комплексных исследований взаимосвязи процессов на морской поверхности и в толще морской среды

5.2. ЛАБОРАТОРНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС

В СПбФ ИО РАН создан лабораторный научно-исследовательский комплекс, включающий гидрофизический, гидроакустический и вращающийся стратифицированный бассейны. В работах по вводу в строй и проведению экспериментов принимают участие К. Б. Филин, к. т. н. Д. А. Никитин, Н. Н. Шпилев, к. т. н. Т. К. Шарафутдинова, В. В. Туманов, М. В. Пуленец, Е. Д. Паничева. В целях обеспечения экспериментальных работ открыта тема «Гидрофизические исследования волновихревых и гидроакустических процессов в крупномасштабных лабораторных бассейнах» (№ FMWE-2024–0029), руководитель — чл.- корр. РАН А. А. Родионов. Научно-технические материалы о бассейне излагаются ниже в соответствии с работой [73].

Важным методом изучения процессов в океане является их физическое моделирование в бассейнах достаточно больших размеров с контролируемыми и воспроизводимыми гидрофизическими условиями [73, 74]. В литературе отмечается, что в таких системах сложно создавать резкие скачки плотности и точно воспроизводить вертикальный профиль температуры в масштабах 1:100 и более в меняющихся условиях эксперимента [74]. Ключевой фактор успешности экспериментальных исследований — контролируемость и воспроизводимость условий эксперимента в серии испытаний. Большой термостратифицированный бассейн СПбФ ИО РАН отличается расширенными возможностями по созданию сложных термических стратификаций, приближенных к наблюдаемым в морях и океанах [2, 73]. Вместе с тем эмпирический подбор режимов установления и поддержания заданной стратификации в бассейне трудоемок, затратен по времени и ресурсам, а также не всегда позволяет достичь требуемого результата. Для решения задачи точной подстройки режимов теплового оборудования и оптимизации эксперимента в СПбФ ИО РАН создается цифровая копия бассейна.

Цифровая копия бассейна — модульная платформа для организации взаимодействия различных моделей (термогидродинамических, турбулентности и т. п.) для изучения волновых, турбулентных и конвективных процессов в стратифицированной среде.

Развитие технологий цифровых копий объекта часто рассматривают как альтернативу модельным или натурным испытаниям во многих областях. Цифровая копия рассматривается в первую очередь как инструмент, призванный оптимизировать серийные эксперименты и, как рациональная опция, позволяющая экстраполировать верифицированные опытным путем зависимости для режимов, сложно поддающихся физическому моделированию (например, высокие числа Рейнольдса и т. п.).

Пример применения цифровой копии — задача установления различных типов стратификации в бассейне за счет бокового прогрева/охлаждения. После включения тепловой/холодильной машины в бассейне в результате свободной конвекции возникают вихревые движения с различным средним

направлением циркуляции жидкости выше и ниже области температурного скачка. Точное установление заданного температурного режима требует детального моделирования конвективных процессов в бассейне [73].

Конвективные течения вязких несжимаемых жидкостей — классический раздел гидродинамики. Численное моделирование конвективных процессов является достаточно сложной задачей, решению которой на основе уравнений Навье-Стокса посвящено множество работ как в России, так и за ее пределами. В работах [75, 76] рассмотрены вопросы двумерного моделирования конвективных процессов, описаны разностные схемы интегрирования уравнений Навье-Стокса. Весьма популярным является в настоящее время метод расщепления по физическим процессам [77, 78]. Однако ограничение данного подхода — необходимость отыскания избыточного давления. При этом нужно решать задачу Неймана для трехмерного уравнения Пуассона, что сопряжено с повышенными требованиями к производительности вычислительных систем. В итоге в качестве наиболее популярного в литературе подхода к моделированию естественной термоконвекции рассматривается упрощенная плоская или двумерная задача. Вместе с тем протекающие физические процессы обуславливают необходимость адекватного воспроизведения вертикальной конвекции, а также горизонтальных градиентных течений. Анализ регистрируемых с помощью радиометра структур конвективных ячеек на поверхности позволяет сделать вывод о существенной трехмерности конвективных ячеек в бассейне (рис. 5.10).

Сформулированная ниже полная трехмерная (негидростатическая) модель бассейна призвана наиболее полно в явном виде с минимумом параметризации воспроизводить конвективные, турбулентные, вихревые и волновые процессы в лабораторном бассейне.

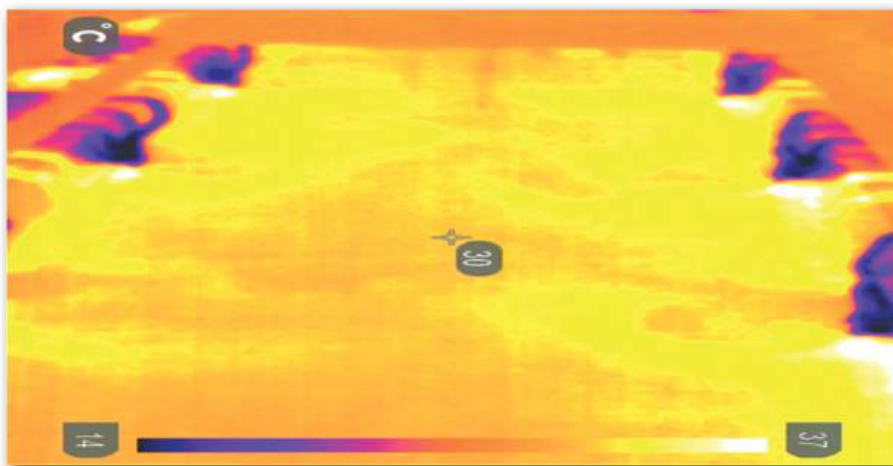


Рис. 5.10. Мгновенный снимок радиометром температуры поверхности бассейна в момент работы теплового оборудования

Математическая постановка задачи

Для создания цифровой копии на первом этапе решается нестационарная трехмерная задача формирования вертикальной температурной стратификации лабораторного опытового бассейна. В основе реализованного варианта лежит классическая система уравнений сохранения массы и импульса (1, 2), дополненная уравнением для переноса трассера c (3) (в рассматриваемом случае — температуры T). Уравнения записаны для движения вязкой несжимаемой жидкости в поле силы тяжести:

$$\nabla \cdot v = d_x u + d_y v + d_z w = 0; \quad (1)$$

$$d_t v = -(v \cdot \nabla) v - \nabla p + b \hat{g} - \nabla \cdot \tau + F_v; \quad (2)$$

$$d_t c = -v \cdot \nabla c - \nabla \cdot q_c + F_c; \quad (3)$$

где (u, v, w) — скорость среды;

$(v \cdot \nabla) v$ — адвекция момента;

∇p — кинематический градиент давления;

$\nabla \cdot \tau$ — молекулярное или турбулентное вязкое напряжение;

F_v, F_c — произвольные внутренние источники импульса и трассера;

$v \cdot \nabla c$ — адвекция трассера (температуры);

$\nabla \cdot q_c$ — молекулярная или турбулентная диффузия;

$b = -\frac{g\rho'}{\rho_0}$ — редуцированное гравитационное ускорение (плавучесть),

$\rho = \rho_0 + \rho$ — плотность среды.

Вычисление плотности по температуре проводилось с использованием международного уравнения состояния TEOS-10.

Моделирование нестационарных турбулентных ограниченных течений осуществляется с использованием классического метода моделирования больших вихрей. Для этого представленная система уравнений (1–3) решается для осредненных по времени пульсаций скорости и давления \tilde{u}, \tilde{p} . А подсеточный тензор напряжений представляется как $\tilde{\tau} = \overline{u \cdot u} - \tilde{u} \cdot \tilde{u}$. В данном случае он характеризует влияние мелкомасштабной турбулентности на разрешенное (отфильтрованное) поле скорости. В большинстве статей в литературе рассматривается так называемый неявный LES подход, при котором фильтрующая функция не используется, а осреднение по пространству получается «автоматически» за счет сетки. Уравнения решаются численно для \tilde{u}, \tilde{p} , а флуктуационная компонента определяется с помощью подсеточной модели (по Смагоринскому). Роль фильтра играет размер ячейки сетки [78].

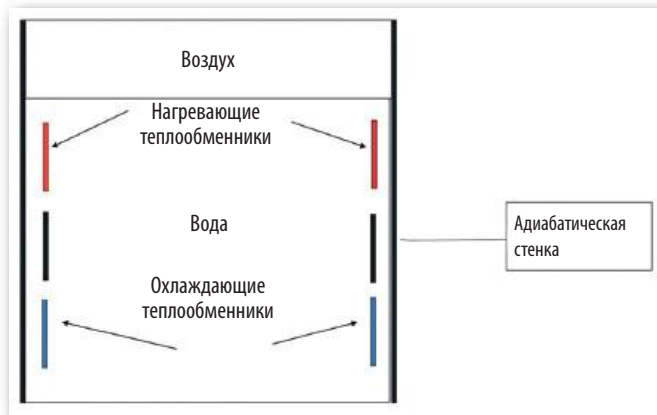


Рис. 5.11. Схема граничных условий и внутренних источников тепла, использованных в модели формирования термической стратификации

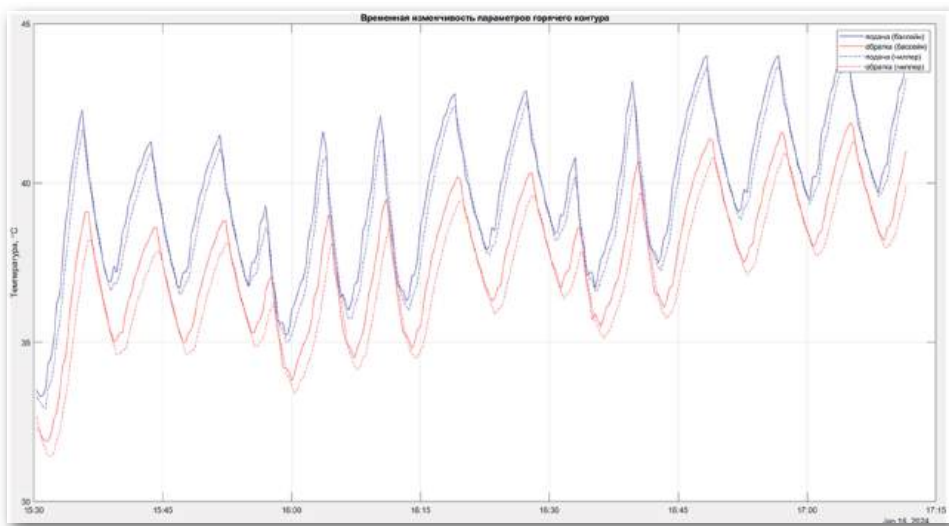


Рис. 5.12. Особенности работы греющего контура теплового потока по данным измерений температуры теплоносителя

В данной постановке реализована идеализированная модель процесса формирования термической стратификации за счет внутренних объемных источников тепла и холода, представленных на рис. 5.11.

Были приняты следующие граничные условия и допущения:

- адиабатические стенки бассейна;
- свободный теплообмен с воздухом помещения (нагрев + испарение);
- ньютоновская жидкость с постоянными теплофизическими свойствами;
- тепловые потоки от теплообменников задаются как объемные источники и стоки в уравнении сохранения тепловой энергии.

В качестве начальных условий задавались измеренный начальный профиль температуры и нулевые скорости.

Поверочный расчет для верификации модели произведен по оценочным значениям теплового потока, определенным по данным измерения расходов и температуры теплоносителя в чиллере [73] и в бассейне для подачи и обратного потока (рис. 5.12). С учетом постоянной времени kt , вычисленной как сдвиг по времени между пиками кривых, из теплового баланса определен суммарный поток теплоотдачи контуров в бассейн:

$$Q = C_p \times \text{Плотность_теплоносителя} \times \text{Расход} \times (T_{\text{подачи}}(t) - T_{\text{обратка}}(t + kt)), \text{ Ватт.} \quad (4)$$

Для прогностических оптимизационных расчетов температура теплоносителя при подаче являлась управляемым параметром, расход теплоносителя принимался постоянным. Отмечается импульсный режим работы теплового оборудования, связанный с конструктивными особенностями тепловых агрегатов.

Численное моделирование

Дискретизация систем уравнений (1–3) осуществляется на равномерной сетке с шагом 1 см по всем направлениям методом контрольных объемов [79]. Данное разрешение позволяет уверенно моделировать вихревые движения масштаба порядка 10 см и больше. При необходимости предусмотрена возможность дополнительного сгущения сетки в зоне волнового интерфейса (термоклина).

В полной нелинейной постановке решение поставленной задачи строится численно с использованием метода конечных объемов в рамках открытого пакета OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD Tool Box) [80]. Как известно, большинство вычислительных пакетов являются проприетарными программными продуктами и требуют крупных финансовых вложений на этапе их приобретения. Но более важно то, что они содержат закрытый программный код и, как следствие, представляют собой «черный ящик» для исследователя. Это ограничивает возможности по созданию, модификации и верификации новых численных моделей, мешает при

оценке точности полученных результатов и т. д. Появление свободного программного пакета OpenFOAM в последние несколько лет позволило изменить данную ситуацию. Широкий инструментарий для формализации задачи, высокая эффективность реализации, а также хорошая масштабируемость под архитектуру вычислительной системы позволяют легко сконструировать численную модель в пакете. Открытый исходный код в свою очередь дает возможность в деталях контролировать ход решения, начиная от построения сетки до выбора схем аппроксимации слагаемых управляющей системы и методов численного решения. В состав Open FOAM входят базовые модели термодинамических свойств веществ, реализующие, к примеру, модель постоянной теплоемкости или рассчитывающие теплоемкости по таблицам JANAF, а также различные модели турбулентности, модели поверхностных пленок пассивной примеси и т. д. Более детальную информацию о методах дискретизации основных уравнений, решения систем линейных уравнений, граничных и постановки начальных условий можно получить из руководства пользователя пакета OpenFOAM [81].

Результаты экспериментов

Структура конвективных ячеек на вертикальном поперечном разрезе в различные моменты времени после начала формирования стратификации приведена на рис. 5.13. Отмечаются зоны интенсивного взаимодействия конвективных потоков ближе к центру бассейна. Интенсивность перемешивания в результате взаимодействия вихревых структур, а также их дальнейшее инерционное продвижение в направлении против действия сил плавучести определяет остроту получаемого термоклина. Данное положение накладывает существенные ограничения на интенсивность нагрева/охлаждения управляющих контуров, что может быть преодолено за счет оптимизированного с использованием цифровой копии комбинированного режима работы оборудования с переменными по времени управляющими параметрами.

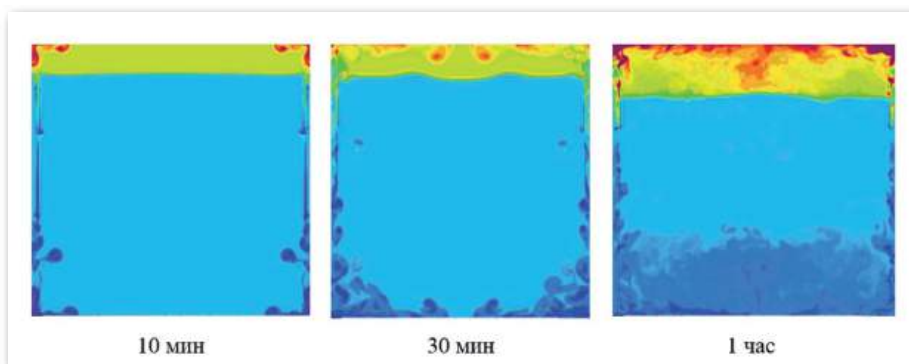


Рис. 5.13. Вертикальная структура конвективных ячеек

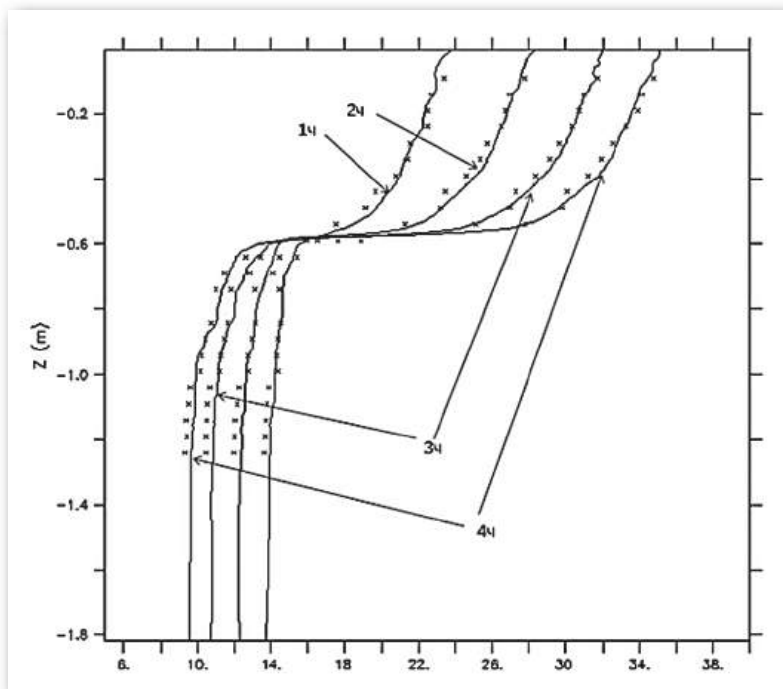


Рис. 5.14. Расчетные (сплошные кривые) и измеренные (символы) значения распределения температуры в центре бассейна для 1–4 часов работы оборудования (указаны цифрами)

Результаты верификации модели по данным контрольного эксперимента по установлению стратификации в бассейне приведены на рис. 5.14 (среднеквадратичное значение разности измеренных и рассчитанных данных составило около $0,1^{\circ}\text{C}$). Поэтому в целом модель адекватно воспроизводит процесс установления термической стратификации в бассейне.

Преимуществом бассейна СПбФ ИО РАН [2, 73] является возможность более тонкой настройки сложной многослойной стратификации за счет дополнительных контуров, работающих в зависимости от режима на обогрев или охлаждение. В силу наличия развитого конвективного движения внутри бассейна необходим очень тщательный подбор динамических режимов оборудования. Эмпирический подбор необходимых режимов очень трудоемок. Использование цифровой модели позволяет достаточно точно подобрать режимы работы оборудования и сократить количество экспериментальных работ. В частности, опытным путем на основе серии вычислительных экспериментов, определены оптимальные температуры теплоносителя на каждом временном отрезке работы оборудования, существенное превышение которых приводит к интенсификации вертикальных конвективных движений и, как следствие, размытию промежуточного термоклина.

Гидроакустический бассейн

Гидроакустический бассейн (рис. 5.15) с рабочим объемом 14,4 м³ предназначен для исследования акустических явлений в жидкости. Научно-технические материалы о бассейне излагаются ниже в соответствии с работой [82]. Для обеспечения звукопоглощения применена облицовка внутренних поверхностей бассейна резиной. Поверхность бассейна перекрывается на-



Рис. 5.15. Внешний вид гидроакустического бассейна

борной крышкой из резины той же марки. Для снижения влияния внешних техногенных шумовых помех фундамент бассейна развязан относительно фундамента здания, а сам бассейн установлен на амортизаторы. В бассейне установлена автоматизированная система линейного перемещения, которая обеспечивает закрепление измерительных излучателей и приемников и испытуемых образцов, перемещение их вдоль и поперек бассейна, вверх, вниз и вращение вокруг геометрической оси, а также отсчет и регистрацию значений текущих координат.

В состав оборудования бассейна входят приемный и излучающий тракты (рис. 5.16); набор гидрофонов фирмы Brüel & Kjær типов 8103 и 8105, фирмы ZETLAB типа BC311 (рис. 5.17); предварительный усилитель ZET 440 и высоковольтный усилитель ZET 420 (рис. 5.18); многофункциональные эхолоты Garmin и Lowrance (рис. 5.19). Для проведения экспериментов по исследованию отражающих свойств объектов изготовлены следующие модели: сплошные и пустотелые стальные сферы и цилиндры (рис. 5.20).

Для оценки возможностей проведения экспериментальных исследований в гидроакустическом бассейне, отработки методик и анализа результатов разработана математическая модель бассейна. В случае, когда температура в бассейне постоянна на момент проведения эксперимента ($T = \text{const}$), скорость звука в бассейне также постоянна $C = C(T) = \text{const}$.

Суммарное акустическое поле в точке измерения может быть рассчитано модифицированным методом мнимых источников при прямолинейном распространении акустических волн. В этом случае учитываются отражения не только от дна и поверхности, но и от боковых стенок бассейна.

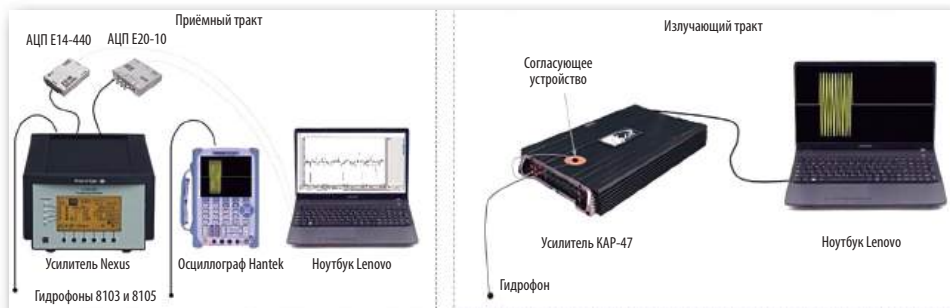


Рис. 5.16. Приемный и излучающий тракты

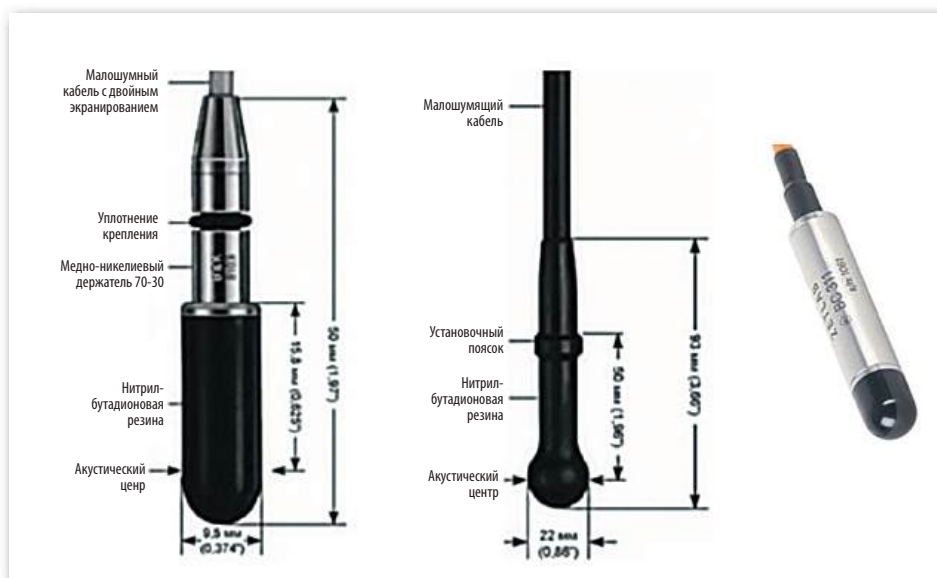


Рис. 5.17. Гидрофоны



Рис. 5.18. Предварительный и высоковольтный усилители



Рис. 5.19. Многофункциональные эхолоты Garmin и Lowrance

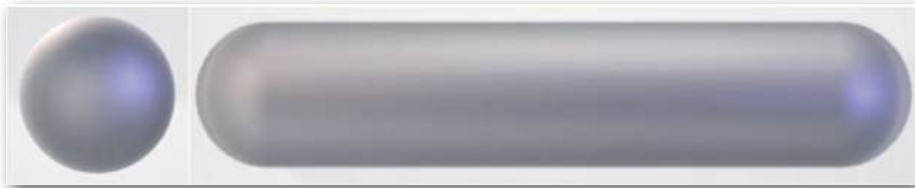


Рис. 5.20. Внешний вид моделей

При использовании в качестве зондирующих сигналов коротких импульсов суммарное поле определяется формулой [82].

$$S(t) = \sum_0^K S_k \left(t - \frac{r_k}{C} \right),$$

где S_k — давление сигнала, распространяющегося по k -й трассе с учетом коэффициента отражения и длины трассы, Па; $S_k = S/r_k$ здесь S — модель сигнала на расстоянии 1 м; r_k — длина k -й трассы, м; K — количество трасс. Нулем обозначена трасса распространения прямого сигнала.

При использовании непрерывных тональных сигналов суммарное поле определяется формулой

$$S(t) = \sum_0^K A_k \left(\omega t - \frac{\omega \Delta r_k}{C} \right),$$

где A_k — амплитуда сигнала, распространяющегося по k -й трассе с учетом коэффициента отражения и длины трассы, Па; $A_k = A/r_k$ здесь A — амплитуда сигнала на расстоянии 1 м; Δr_k — разность длин k -й и нулевой трассы, м; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота сигнала, радиан/с.

В бассейне к настоящему времени отработаны методики и проведены лабораторные эксперименты по формированию и излучению гидроакустических сигналов различных типов; по многоканальному приему, аналого-цифровому преобразованию и регистрации гидроакустических сигналов;

по оценке характеристик излучающих и приемных антенн различных типов, в том числе оптоволоконных акустических датчиков; по оценке чувствительности гидрофонов; по прохождению звуковых волн через границу «вода — воздух»; по исследованию отражающих свойств моделей объектов; по оценке заглушенности бассейна.

Созданный и введенный в эксплуатацию гидроакустический бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН представляет собой уникальный научно-исследовательский комплекс, оснащенный современными средствами моделирования, излучения, приема, обработки и анализа гидроакустических сигналов.

ИЗУЧЕНИЕ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ В ЭКСПЕДИЦИЯХ

Экспедиционные экспериментальные исследования являются неотъемлемой частью деятельности Филиала. С 2021 по 2025 гг. сотрудники организовали или участвовали в проведении 20 экспедиций. Натурные работы проводилась в морях Северного Ледовитого, Атлантического и Тихого океанов, а также в Онежском и Ладожском озерах. Целями экспедиций являлись экспериментальные исследования пространственно-временных и энергетических характеристик субмезо- и мезомасштабных процессов и явлений. Изучались гидрофизические и гидрооптические поля контактными и дистанционными средствами измерений.

Ниже представлены основные данные по проведенным экспедициям.

2021 г.

Тема: Исследование изменчивости гидрологических и гидрохимических полей в приливном море в области смещения морских и речных вод при наличии ледяного покрова. Регион проведения: Кемская губа Белого моря. Прибрежная ледовая экспедиция, январь 2021 г., 5 суток. Сотрудники: Зимин А. В., Коник А. А., Свергун Е. И. (рис. 6.1).

Тема: Экспериментальные исследования гидрофизических полей в Тихом океане. Регион проведения: Четвертый Курильский пролив. Малое гидрографическое судно «ГС-269», июнь-июль 2021 г., 24 суток. Сотрудники: Шиптенко А. Н., Зимин А. В., Коник А. А., Свергун Е. И. (рис. 6.2).

Тема: Комплексная экспедиция в Балтийское море, совмещенная с Международной летней школой «Береговая зона моря: управление, исследования и перспективы». Регион проведения: Балтийское море. НИС «Академик Сергей Вавилов», 51-й рейс, июнь-июль 2021 г., 16 суток. Сотрудник: Атаджанова О. А.

Тема: Экспериментальные исследования гидрофизических полей в Баренцевом море. Регион проведения: южная часть Баренцева моря. Малое гидрографическое судно «Николай Скосырев», июль-август 2021 г., 36 суток. Сотрудники: Зимин А. В., Коник А. А., Свергун Е. И.

Тема: Дистанционное исследование гидрооптических характеристик и особенностей вод Баренцева моря с использованием разработанного лидара. Регион проведения: Баренцево море. Лидарная съемка производилась с борта самолета-лаборатории АН-30Д, июль-август 2021 г., 30 суток. Сотрудники: Сбитной М. Л., Глухов В. А., Глитко О. В. (рис. 6.3).



Рис. 6.1. Работа на льду Белого моря, подготовка к проведению измерений характеристик приливной динамики



Рис. 6.2. Кони́к А. А., Зими́н А. В. гото́вятся к постано́вке за бо́рт термоко́сы



Рис. 6.3. Экипа́ж самоле́та-лабора́тории АН-30Д и уча́стники экспеди́ции

2022 г.

Тема: Исследование субмезомасштабных структур вблизи речного плюма р. Кемь в зимний период. Регион проведения: Белое море, Кемская губа. Прибрежная ледовая экспедиция, март 2022 г., 5 суток. Сотрудники: Зимин А. В., Свергун Е. И., Коник А. А.

Тема: НИР по изучению скоростей и направлений течений в зоне рассеивающегося водовыпуска ООО «РК-Гранд». Регион проведения: Ладожское озеро, акватория у г. Питкяранта. Катера, май 2022 г., 4 суток. Сотрудники: Зимин А. В., Атаджанова О. А., Коник А. А. (рис. 6.4).

Тема: Отработка методов оперативного измерения гидрофизических параметров морской среды с помощью кластера дрейфующих буев. Регион проведения: Онежское озеро. НИС «Эколог», июнь 2022 г., 8 суток. Сотрудники: Зимин А. В., Атаджанова О. А.

Тема: Комплексные экспериментальные исследования гидрофизических полей Баренцева моря. Регион проведения: западная часть Баренцева моря, Мотовский залив. МГС «ГС-278», июль-август 2022 г., 18 суток. Сотрудники: Калашников Н. Ф., Свергун Е. И., Коник А. А. (рис. 6.5).

Тема: Дистанционное исследование гидрооптических характеристик и особенностей вод Баренцева и Карского морей с использованием разработанного лидара. Регион проведения: Баренцево море, Карское море. НИС «Академик Мстислав Келдыш», 89-й рейс (1-й этап), сентябрь 2022 г., 14 суток. Сотрудники: Глитко О. В., Глухов В. А. (рис. 6.6).



Рис. 6.4. Работа на льду Белого моря, подготовка к проведению измерений



Рис. 6.5. МГС «ГС-278»



Рис. 6.6. Сотрудники СПбФ ИО РАН
Глухов В. А. и Глитко О. В.

2023 г.

Тема: Выполнение комплексных исследований гидрологического и биологического режима Белого моря под влиянием приливных процессов. Регион проведения: Белое море, Кемская губа. Прибрежная ледовая экспедиция, март 2023 г., 5 суток. Сотрудники: Зимин А. В., Благодатских Е. А.

Тема: Выполнение комплексных исследований гидрологического и биологического режима Белого моря под влиянием приливных процессов. Регион проведения: Белое море, акватория около м. Каргеш. Прибрежная ледовая экспедиция, март 2023 г., 6 суток. Сотрудники: Свергун Е. И., Коник А. А.

Тема: Сбор данных для комплексного анализа процессов в области прикромочной зоны в Баренцевом море. Регион проведения: Баренцево море. НИС «Дальние Зеленцы», апрель-май 2023 г., 26 суток. Сотрудники: Зимин А. В., Атаджанова О. А.

Тема: Выполнение комплексных исследований гидрологического и биологического режима Белого моря под влиянием приливных процессов. Регион проведения: Белое море, Онежская губа. НИС «Эколог», июнь 2023 г., 11 суток. Сотрудники: Атаджанова О. А., Свергун Е. И. (рис. 6.7).

Тема: Исследование водных масс на шельфе и континентальном склоне морей Российской Арктики, подготовка молодого кадрового резерва в области морских наук по научно-образовательной программе «Плавучий университет». Регион проведения: Баренцево море, Карское море. НИС «Дальние Зеленцы», июль-август 2023 г., 20 суток. Сотрудники: Зимин А. В., Свергун Е. И., Благодатских Е. А.



Рис. 6.7. Атаджанова О. А., Свергун Е. И. готовятся к зондированию с использованием зонда STD-90 М

2024 г.

Тема: Изучение влияния приливной динамики на вертикальное распределение икры восточнокамчатского минтая в глубоководных каньонах Авачинского залива. Регион проведения: Тихий океан, Авачинский залив. НИС «Инженер Мартынов», апрель 2024 г., 10 суток. Сотрудники: Зимин А. В., Коник А. А., Свергун Е. И. (рис. 6.8).

Тема: Исследование потенциала лидарного зондирования в водах низкой прозрачности и обучение студентов «Плавающего университета» основам гидрооптики. Регион проведения: Выборгский залив Балтийского моря. Яхта «Candy», июнь 2024 г., 2 суток. Сотрудники: Глитко О. В., Глухов В. А.

Тема: Оценка состояния прибрежных морских экосистем дальневосточных морей в условиях глобального изменения климата и возрастающей антропогенной нагрузки и реализация научно-образовательной программы «Тихоокеанский плавающий университет». Регион проведения: Тихий океан, Охотское море. НИС «Профессор Мультиановский», июль-сентябрь 2024 г., 35 суток. Сотрудники: Коник А. А., Атаджанова О. А. (рис. 6.9).



Рис. 6.8. Свергун Е. И. проводит работы по отбору проб с помощью ихтиопланктонной сети

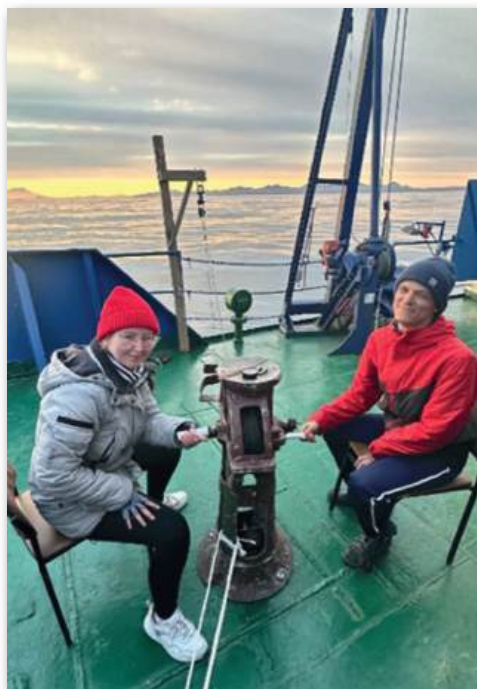


Рис. 6.9. Атаджанова О. А. и Коник А. А. проводят сканирование водной толщи на суточной гидрологической станции



Рис. 6.10. Отряд мезомасштабных процессов под руководством сотрудников СПбФ ИО РАН



Рис. 6.11. Отряд субмезомасштабных процессов (сотрудники СПбФ ИО РАН)

Тема: Исследование водных масс на шельфе и континентальном склоне морей Российской Арктики, а также подготовка молодого кадрового резерва в области морских наук по научно-образовательной программе «Плавучий университет». Регион проведения: Баренцево море, Карское море, море Лаптевых. НИС «Профессор Молчанов», июль-август 2024 г., 44 суток. Сотрудники: Зимин А. В., Свергун Е. И. (рис. 6.10).

2025 г.

Тема: Изучение гидрологической и гидрооптической структуры вод, а также поля короткопериодных внутренних волн на шельфе Черного моря контактными и дистанционными методами. Регион проведения: Черное море. НИС «Профессор Водяницкий», 135 рейс, май-июнь 2024 г., 26 суток. Сотрудники: Свергун Е. И., Паничева Е. Д., Шарифутдинова Т. К., Глитко О. В., Глухов В. А. (рис. 6.11).

В ходе экспедиционных исследований:

- оценены статистические характеристики субмезомасштабных процессов и явлений внутренних волн, вихревых структур, фронтальных зон, — в Черном, Балтийском, Белом, Баренцевом, Карском, Охотском морях и в акваториях Тихого океана, прилегающих к Камчатскому полуострову и Курильским островам;
- выявлены районы наблюдения экстремальных амплитуд короткопериодных внутренних волн в указанных акваториях;
- отработаны методики дистанционной лидарной регистрации гидрооптических неоднородностей морской среды с морских и авиационных носителей;
- оценены взаимосвязи гидрологических, гидрооптических характеристик морской среды и сигналов обратного рассеяния лидара;
- собран банк экспериментальных гидрофизических и гидрооптических данных.

Полученные экспериментальные данные являются основой для верификации физико-математических моделей и установления закономерностей эволюции гидрофизических процессов.

ТРИСТА ЛЕТ ЗДАНИЮ НА ПЕРВОЙ ЛИНИИ

Ни для кого не секрет, что трехсотлетие учреждения — это почетный и убедительный срок. В 2024 г. отмечалось трехсотлетие Российской академии наук: к этому событию было приурочено множество конгрессов, конференций и съездов. Юбилейный год натолкнул на мысль, что все аспекты академического существования заслуживают того, чтобы быть упомянутыми в исторических исследованиях. В данной главе речь пойдет о здании, в котором ныне располагается Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук и которому в 2025 г. также исполняется 300 лет.

В 2020 г. увидела свет коллективная монография «Здание Санкт-Петербургского филиала Института океанологии на Васильевском острове. История и современность» [83]. К настоящему времени удалось обнаружить новые факты, касающиеся истории дома № 30 по Первой линии.

«Лицевое строение на современном участке под № 30 по 1-й линии построено в начале 1720-х гг. в соответствии с проектом Д. Трезини как каменный двухэтажный дом на высоком подвале... На “Генеральном плане” столицы 1738 г. типовой одинарный участок, поделенный надвое, обозначен как участок “двух Долгоруковых”. По внешним боковым границам участка Долгоруковых к дворовым фасадам домов были сделаны пристройки..., а со стороны внутреннего проезда (современной улицы Репина) располагались вдоль боковых границ владения симметрично поставленные, отдельно стоящие, протяженные здания служб... Между участками домовладений, обозначенными №№ 16 (“двух Долгоруковых”) и 17 (Юшкова), находилось незастроенное... место, скорее всего, тоже принадлежавшее Долгоруковым» [83, с. 5; 84].

Естественным образом возникает вопрос о родстве «двух» Долгоруковых, а также о том, насколько вторые из упомянутых Долгоруковых (вероятные владельцы незастроенного участка) идентичны первым. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона пишет о роде Долгоруковых следующее: «Долгоруковы и Долгорукие — русский княжеский род, происходящий от св. кн. Михаила Всеволодовича Черниговского. Потомок его в седьмом колене, кн. Иван Андреевич Оболенской, прозванный Долгоруким, был родоначальником князей Д. Из этого рода было шесть бояр, четыре окольничих, один фельдмаршал. Род князей Д. разделился на три ветви, происходящие от окольничего кн. Федора Федоровича († в 1664 г.) и бояр Юрия († в 1682 г.) и Димитрия († в 1674 г.) Алексеевичей. Он внесен в V часть родословной книги Владимирской, Московской, Подольской, Полтавской, С.-Петербургской, Симбирской, Тульской и Черниговской губ.» [85]. Большая российская

энциклопедия предлагает расширенную версию, из которой, убрав информацию о Долгоруковых, по той или иной причине изменивших фамилию, и женщинах, и оставив только тех, кто хронологически подходит под первую четверть XVIII в., узнаем следующее: «Долгоруковы (Долгорукие), рус. княжеский род, Рюриковичи, отрасль князей Оболенских. Родоначальник Д. — старший сын кн. А. К. Оболенского — Иван Андреевич Оболенский (1-я пол. 15 в.), получивший прозвище Долгорукой (Долгорукий). Его внуки (Семен Владимирович, Федор Владимирович Старший, Тимофей Владимирович и Михаил Владимирович Птица) стали основателями 4 ветвей рода... Из детей А. Г. Долгорукова наиболее известны: Иван Алексеевич [1708–8 (19).11.1739], получивший указом имп. Петра II титул “светлости” (1729), ген. от инф. (1728), обер-камергер (1728)... Родоначальник 2-й линии 3-й ветви, внук М. Ю. Долгорукова — Владимир Петрович [7 (17).7.1699–21.5 (1.6).1761], ген.-поручик (1755), вице-губернатор Рижской губ. (1742–53), губернатор Ревельской (1753–58) и Рижской (1758–61) губерний... Родоначальник 4-й линии 3-й ветви — Михаил Владимирович [14 (24).11.1667–21.11 (2.12).1750], д. тайн. сов. (1729; лишен чина в 1739, вновь получил его в 1741), сенатор (1711–39, 1741–1750), в 1718 арестован по делу царевича Алексея Петровича и выслан из Москвы (возвращен в 1721)» [86].

Таким образом список потомков княжеской фамилии существенно сузился, что важно при идентификации владельцев земельных участков и зданий на Васильевском острове в 20-х гг. XVIII в.

Обнаруженная в опубликованных и архивных источниках подборка домо-и дворовладений, принадлежавших Долгоруковым, впечатляет, и это при том, что мы рассматриваем только Васильевский остров, не останавливаясь на других районах Санкт-Петербурга — Адмиралтейской части, Литейной стороне и Петербургском острове. Первым пунктом списка приведем информацию о строении, в котором на сегодняшний день располагается Санкт-Петербургский филиал Института океанологии.

Под заглавием «Дворы князей Долгоруковых» содержится следующая информация: «Участок по Первому каналу под каменное строение был отведен князьям — Сергею, капралу Преображенского полка Владимиру, Михаилу, Александру и Якову Петровым, детям Долгоруковым, в 1725 г... На “плане Зигхейма” 1738 г. [план Зигхейма 1738 г. и генеральный план 1738 г. — это один и тот же картографический документ — *А.Р., А.Л., Т.М.*] под № 16, а на плане 1741 г. под № 26 показаны дворы “двух Долгоруких” с каменным строением по линии... По описи 1732 г., на дворе «построены токмо погребные стены»... Современный адрес: Первая линия, № 28 [несущественный сбой нумерации возможен — *А.Р., А.Л., Т.М.*]» [87, с. 270; 88]. Из перечисленных владельцев участка мы предположительно узнаем Владимира Петровича (на тот момент капрала, а позже — генерала-поручика) (рис. 7.1). Однако же загадкой остается, кто именно из списка — второй Долгоруков из «двоих», прописанных на плане 1738 г.

Что еще узнаем о здании, ныне принадлежащем Санкт-Петербургскому филиалу? «1725 г., января 18. — Запись подрядной крестьянина деревни Сидоркино Великосольской волости Костромского уезда М. В. Говорова и крестьянина деревни Ворокса Ярославского уезда А. А. Королева сибирскому губернатору князю М. В. Долгорукову и князю Ю. Ю. Долгорукову на строительство двух каменных домов на Васильевском острове» [87, с. 663; 90]. Этот документ несколько противоречит предыдущему. Во-первых, в нем речь идет именно о двух Долгоруковых. Во-вторых, упоминаемый «М.В.» — это, по всей видимости, Михаил Владимирович (рис. 7.2), представитель другой княжеской ветви Долгоруковых.



Рис. 7.1. Владимир Петрович Долгоруков (1699–1761) [89]

В исторических документах были обнаружены любопытные детали, касающиеся строительства каменных домов Долгоруковых. Так, «существенные подробности о подрядном строительстве каменных домов князей — Юрия Юрьевича и Ивана Юрьевича Долгоруковых — представлены в иске, предъявленном в 1732 г. в Комиссию описи пожитков кн. Долгоруких строительным подрядчиком М. В. Говоровым, также в связи с недоплатой денег по договору» [87, с. 16; 88]. Фамилия подрядчика — Говоров — с предыдущим приведенным документом совпадает. Также очевидно, что упоминаемый Юрий Юрьевич Долгоруков — это один из владельцев рассматриваемого участка. Однако выясняется, что финансовая картина строительства была не так уж оптимистична: «в делах... Дворцового ведомства, а также в фонде Сената... хранятся описи имущества опальных царедворцев — князей В. Л. Долгорукова и А. Г. Долгорукова... (осуждены в 1730 г. по делу о ложном завещании императора Петра II Алексеевича)» [87, с. 16; 88].

Таким образом появляются новые Долгоруковы применимо к тому же самому участку и строению. «А.Г.» — это, судя по всему, основатель ветви князей Долгоруковых, от которой пошли и Владимир Петрович, и Михаил Владимирович, — князь Алексей Григорьевич (рис. 7.3), русский государственный деятель, член Верховного тайного совета при Петре II, сенатор, умерший в 1734 г. в Березове — традиционном месте ссылки русской послепетровской знати. О том же, что у домовладельцев были финансовые сложности говорит и заметка в Санкт-Петербургских ведомостях за 1738 г.: «В нынешнюю среду то есть 2 числа Августа, в 4 часу по полудни публичной



Рис. 7.2. Михаил Владимирович Долгоруков (1667–1750) [91]



Рис. 7.3. Алексей Григорьевич Долгоруков (?–1734) [92]

Аукционист Кенигс-Фелт будет продавать, на Васильевском острове по конец первой линии, в доме господина Князя Долгорукова, у иноземца Бекмана, разныя вещи, а имянно: зеркало с позолочеными рамами и верхом, несколько сундуков, между которыми один большой обитой, куфер с 4 колесами, стулья золотою кожею обитыя, оловянная, также из красной и зеленой меди, поваренная посуда, скатерти, салфетки, и черной бой, о чем чрез сие объявляется, а вышеозначенныя вещи можно в помянутом доме видеть» [93].

Судя по всему, опальный А. Г. Долгоруков, осужденный в 1730 г., оставил после себя долги, которые последующие домовладельцы так и не сумели оплатить, что привело к тотальной продаже имущества, вплоть до скатертей и салфеток, через восемь лет после ареста.

Остается вопрос о втором домовладении (подрядная была получена на строительства «двух каменных домов на Васильевском острове»). Документы, проясняющие ситуацию, содержатся под заглавием «Двор князя Сергея Владимировича сына Долгорукова, князя Михаила Долгорукова»: «Участок по Первому каналу был отведен под каменное строение князю Сергею Долгорукову в 1724 г... На “плане Зигхейма”... под № 21, а на плане 1741 г. под № 20 показан сквозной (как и последующие) на внутренний проезд между Первой и Второй линиями..., двор князя Михаила Долгорукова — бывшее владение С. Долгорукова — с каменным домом по линии; в экспликации к плану 1738 г. значится как “фундамент”... По описи 1732 г., на дворе, числившемся за князем С. Долгоруковым, “сверх погребов первого апартаменту мало не до-

строено”... На аксонометрическом плане Санкт-Петербурга 1765–1773 гг. [имеется в виду Аксонометрический план Сент-Илера — *А.Р., А.Л., Т.М.*] палаты на дворе показаны недостроенными — выведен лишь погребной этаж» [87, с. 265–266; 88]. Это замечание крайне важно, так как известно, что план Сент-Илера, хотя и «выходит за рамки петровского времени», однако же представляет собой уникальный картографический источник, «поскольку большинство домов первой четверти XVIII в. стояли еще ко времени его составления на своих местах и сохраняли архитектурный облик» [87, с. 23]. Упомянутый «Михаил Долгоруков» — это, по всей видимости, Михаил Владимирович, который также владел и зданием, в котором ныне располагается Санкт-Петербургский филиал. Таким образом, можно предположить, что нынешние дома № 30 и № 20 (угловое строение, на котором расположена отметка высоты наводнения 7 (19) ноября 1824 г. — это и есть те самые «два каменных дома».

Однако же картина владений Долгоруковых на Васильевском острове не ограничивается рассмотренными зданиями. Ветвей потомков князей Долгоруковых было множество, людьми они были достаточно состоятельными, и в их собственности были и участки, и дома. Приведем выписки из документов, подтверждающие это предположение, а также изображение примерного, с учетом возможного сбоя в нумерации зданий, расположения владений Долгоруковых (рис. 7.4).

«Двор князя Алексея Григорьевича Долгорукова, графа Ф.К. фон Вратислава»: «Участок под “каменное по берегу строение” был отведен князю А. Долгорукову в 1721 г... На «плане Зигхейма»... под № 36 и на плане 1741 г. под № 77... показан двор князя Долгорукова с каменным домом по набережной и деревянным строением — в глубине двора к безымянному переулку, проложенному за участками по набережной» [87, с. 125–128; 88]. Современный адрес — Университетская набережная, дом 17. Здесь уместно вспомнить, что в 1719 г. «был дан указ о строительстве на Васильевском острове по берегу Невы и по каналам при палатах гаваней (причалов) таким образом, как сделано на Адмиралтейском острове по берегу Большой Невы...; т. е. было предписано делать к двум домам одну гавань, “как покажет архитектор Трезин”; не исключалось, а даже позволялось и было “невозбранно”, “ежели кто похочет”, делать гавани и при деревянных домах. На дворах, застраивавшихся подрядом, канал предполагали делать — А.Л. Стрешнев, В.И. Вольнский, А.И. Репнин (глубиной в 7 футов), А.Г. Долгоруков (канал делали в середине палат шириной в полторы сажени, по обе стороны от канала набивали паженные сваи длиной в 14 футов, ниже ординарной воды на два фута (впоследствии вместо канала сделан погреб)» [87, с. 54].

«Двор князя Василия Лукича Долгорукова, Нижняя Морская аптека»: «На “плане Зигхейма”... под № 37 и на плане 1741 г. под № 78... угловым к Четвертой линии показан двор Морской аптеки — бывшее владение В. Долгорукова — с каменным строением по набережной и к линии, а также с деревянным

строением вдоль линии и в глубине двора к безымянному переулку, проложенному за участками по набережной... По описи 1730 г., каменные палаты князя В. Л. Долгорукова были построены в три апартаментов на погребах» [87, с. 128–129; 88]. Современный адрес — Университетская набережная, дом 17. Идентичность адреса предыдущему пункту, по всей видимости, объясняется наличием флигелей или дополнительных строений.

«Двор князя Сергея Петровича Долгорукова»: «Участок в Девятнадцатой линии под “каменное по берегу строение” был отведен князю С. Долгорукову, вероятнее всего, как и его соседям, в 1718 г... На “плане Зигхейма”... под № 101, а на плане 1741 г. под № 77 угловым к Девятнадцатой линии показан двор советника Долгорукова с каменным домом по набережной и деревянным строением к линии и переулку, проложенному за участками по набережной» [87, с. 199; 88]. Современный адрес — набережная Лейтенанта Шмидта, дом 43.

«Двор князей Юрия Юрьевича и Ивана Юрьевича Долгоруковых»: «Участок по Первому каналу под каменное строение был отведен князьям Ю. Ю. и И. Ю. Долгоруковым в 1725 г... На “плане Зигхейма”... под литерой “У”, а на плане 1741 г. под № 4 показан участок князя Долгорукова с каменным домом по линии и деревянным строением по периметру двора и к нынешнему Тучкову переулку; в экспликации значится “за Кадетским садом”» [87, с. 248–250; 88]. Современный адрес — Кадетская линия, дом 17.

«Двор князя Михаила Владимировича Долгорукова»: «Участок по Первому каналу под каменное строение был отведен сибирскому губернатору князю М. В. Долгорукову в 1725 г... На “плане Зигхейма” 1738 г. под литерой “Z”, а на плане 1741 г. под № 5 по соседству с владением князей Ю. Ю. и И. Ю. Долгоруковых показан участок без построек; в экспликации значится как “фундамент”; вероятно, это двор М. В. Долгорукова» [87, с. 250; 88]. Современный адрес — Кадетская линия, дом 19.

«Двор ученика Академии князя Никиты Иванова сына Долгорукова»: «Участок в Четвертой линии под деревянное строение был отведен Н. И. Долгорукову в 1720 г... По описи 1732 г., на дворе “построено, а не покрыто и двор не огорожен”» [87, с. 331–332; 88]. Современный адрес — видимо, угол Четвертой линии и набережной Невы.

«Двор князя Ивана Ивановича Долгорукова»: «Участок в Седьмой линии под “каменное по каналом” строение был отведен князю И. И. Долгорукову в 1719 г... На “Плане Зигхейма”... под № 47, а на плане 1741 г. под № 226 показан участок князя И. И. Долгорукова с каменным по линии строением; в экспликации к плану 1741 г. ошибочно значится под № 216» [87, с. 377–379; 88]. Современный адрес — Седьмая линия, дом 16.

«Двор князя Сергея Григорьевича Долгорукова, князя Сергея Михайловича Долгорукова»: «Участок в Седьмой линии под “каменное по каналом” строение был отведен князю С. Г. Долгорукову в 1724 г... На “Плане Зигхейма”... под № 46 двор князя Сергея Михайловича Долгорукова, а на плане

1741 г. под № 227 — князя С. Долгорукова — показан с каменным по линии строением на углу нынешнего Днепровского переулка» [87, с. 379–380; 88]. Современный адрес — Седьмая линия, дом 18.

«Двор Касимовского царевича, князя Алексея Григорьева сына Долгорукова, его жены Прасковьи Юрьевны»: «Участок в Девятой линии под деревянное строение был отведен Касимовскому царевичу в 1724 г... При князе А. Г. Долгорукове на бывшем дворе Касимовского царевича по описи 1730 г. имелось “деревянного ветхого строения — 7 покоев в одной связи”» [87, с. 406–407; 88]. Современный адрес — видимо, угол Девятой линии и набережной Невы.



Рис. 7.4. Примерное расположение владений Долгоруковых на Васильевском острове в XVIII в.

Поиск новой информации (документов, архивных материалов), касающейся истории здания, в котором располагается Санкт-Петербургский филиал, продолжается. Интерес представляют градостроительные подробности, архитектурные нововведения и нюансы, история владельцев дома — словом, все те детали, из многообразия которых и выстраивается общая картина существования и развития здания, которое дорого для всех нынешних и, дай Бог, будущих поколений петербургских океанологов.

23 июня 2025 г. по поводу 300-летнего юбилея здания на его фасаде, а также на воротах со стороны улицы Репина были установлены памятные таблички с QR-кодом, содержащим информацию об истории места.

Авторы благодарят старшего научного сотрудника Библиотеки Российской академии наук, кандидата философских наук Станислава Юрьевича Нечаева за всестороннюю помощь в поиске исторических документов.

«ЧЕТВЁРТЫЕ ЧЕТВЕРГИ НА ПЕРВОЙ ЛИНИИ»

Идея какое-то время вынашивалась. Хотелось создать что-то «внеурочное», «отдохновенное», чтобы раз в некую единицу времени была возможность по окончании сложного рабочего дня собраться всем вместе, отвлечься от накопившегося и погрузиться в абстрактное (на тот момент так казалось), но при этом красивое, интересное и важное. Воплотить такую задумку в жизнь, задумку, которая, по-хорошему, даже сформулирована не абсолютно, — дело непростое, и мы к реализации подбирались небыстро, тщательно оттачивая форму и содержание. Мысли, что имеем дело с попыткой зародить новую традицию, не было. Осознание пришло чуть позже, когда потянулись слушатели, были и «внешние», потому что информация о наших мероприятиях «вышла» за пределы Филиала.

Название «Четвёртые четверги на первой линии» придумалось само собой. Здесь и красивая игра цифр, и красивая игра букв, и временной регламент — показалось, что звучит легко и запоминаемо. Почему четверги? Видимо, потому, что понедельник и вторник — это ещё начало недели, пятница — её завершение, а среда... Регулярные «среды» для Петербурга — это уже было: вспомним Вячеслава Иванова и Лидию Зиновьеву-Аннибал, дом 35 по Таврической улице, «башню» на шестом этаже в круглом эркере. Так что выбор не мог пасть ни на какой другой день недели. «Четверги» были предопределены: новое мероприятие зародилась как сочетание приверженности культурным традициям Ленинграда — Санкт-Петербурга и насущной необходимости создать новое.

Позже «вырисовался» ещё один любопытный аспект. «Четвёртые четверги» — это классический пример лингвистического оборота, известного как «*Figura etymologica*», устойчивого сочетания однокоренных слов. Можно привести такие примеры как «сказка сказывается», «дело делается». Апогея данный оборот достигает в Ветхом завете, в Книге Исаии: «Злодеи злодействуют, и злодействуют злодеи злодейски» [Исаия, 24, 16]. Невольно, ориентируясь на звучание, мы поддержали древнейший языковой канон. Это, надеюсь, может быть признаком ритуала новорождённого.

Был ли страх, что идею не поддержат? Слукавим, если ответим отрицательно. Боялись, скорее, даже не факта неприятия, а эмоционального отторжения: не хотелось услышать в ответ смех. Ответом была дискуссия: почему четверги, почему в семнадцать, не поздно ли. Но устроилось, улеглось. Кто-то изначально с радостью поддержал, кто-то втянулся по мере наращивания ресурсов, а кто-то, кто не хотел ходить, так ни разу и не пришёл.

Велико чувство благодарности со стороны инициаторов, организаторов и слушателей в адрес лекторов, принявших участие в «Четвёртых четвергах».

И не только лекторов: были и музыкальные вечера, и пешеходные экскурсии, и походы в музеи. Перечислим всё — эта память нам нужна для создания целостного образа нашего мероприятия.

- ❑ 25 ноября 2021 г. — «Форт Кроншлот: начальный этап изучения наводнений Невы» (Татьяна Игоревна Малова).
- ❑ 23 декабря 2021 г. — «История лоцманской службы» (Наталья Ивановна Каралаш).
- ❑ 27 января 2022 г. — «Исследование когнитивных функций зубатых китообразных на примере внедрения новых методических приёмов в изучении сонара для точной идентификации вербальных сигналов при коммуникационном взаимодействии» (Михаил Павлович Иванов).
- ❑ 24 февраля 2022 г. — «Дубинка/трость как часть образа Петра Великого» и «Монеты Петра I на Соломоновых островах» (Андрей Юрьевич Епатко).
- ❑ 24 марта 2022 г. — «Путь яхтинга» (Виктор Анатольевич Горчаков).
- ❑ 21 апреля 2022 г. — «История метра» (Владимир Алексеевич Белобров).
- ❑ 26 мая 2022 г. — Показ документального фильма о Л. Н. Гумилёве «Воскресать. Умирать. Жить» (Елена Глебова Плугатырёва).
- ❑ 23 июня 2022 г. — «Теория симметрии как ключ к пониманию пути развития больших систем» (Михаил Аркадьевич Мамаев).
- ❑ 29 сентября 2022 г. — «"Матрозы, не шуми": о быте и нравах петровского флота» (Борис Вадимович Мегорский).
- ❑ 27 октября 2022 г. — «Корейский язык как зеркало культуры» (Елизавета Викторовна Горчакова).
- ❑ 24 ноября 2022 г. — «История ямского дела в России» (Владимир Алексеевич Белобров).
- ❑ 22 декабря 2022 г. — «Модель Вселенной эпохи Ренессанса. Астрономические часы 1584 г. в собрании Эрмитажа» (Григорий Борисович Ястребинский).
- ❑ 26 января 2023 г. — Экскурсия на ретро-трамвае.
- ❑ 23 марта 2023 г. — «Исторические районы. Удельная» (Сергей Евгеньевич Глезеров).
- ❑ 30 марта 2023 г. — «Долгая выдержка». Презентация книги об экспедиции Г. Я. Седова к Северному полюсу (Евгений Анатольевич Тенетов).
- ❑ 27 апреля 2023 г. — «История Чебурашки и не только...» (к 125-летию Е. С. Деммени) (Фаина Ивановна Костина).

- 25 мая 2023 г.— Органный концерт в НИИ Акушерства, гинекологии и репродуктологии им. Д. О. Отта (Григорий Владимирович Варшавский).
- 22 июня 2023 г.— Экскурсия по улице Репина (Василий Олегович Бочаров).
- 28 сентября 2023 г.— Прогулка по Летнему саду (Марина Борисовна Гоголина).
- 26 октября 2023 г.— Экскурсия в Домик Петра (Надежда Алексеевна Александровна).
- 23 ноября 2023 г.— Музыкальный вечер (Тимур Султанович Шаов).
- 28 декабря 2023 г.— «Лаборатория научной реставрации тканей и водоразмываемой живописи Государственного Эрмитажа» (Марина Владимировна Денисова).
- 25 января 2024 г.— Экскурсия в фондохранилище Государственного Эрмитажа.
- 29 февраля 2024 г.— «К 100-летию Гражданской авиации России. Малоизвестные страницы истории. Из биографии заслуженного пилота СССР А. Г. Федотова» (Григорий Александрович Федотов).
- 28 марта 2024 г.— «Пропавшие в кинохронике» (экскурсия на Ленфильм).
- 25 апреля 2024 г.— Экскурсия в музей Училища подводного плавания (Ильхом Казакджанович Исматуллаев).
- 23 мая 2024 г.— «Способ выполнения поддельных банкнот достоинством 5000 рублей. Случай из экспертной практики» (Людмила Юрьевна Фомичёва).
- 27 июня 2024 г.— Экскурсия в Аптеку доктора Пеля.
- 23 сентября 2024 г.— Экскурсия в Отдел рукописей Библиотеки Академии наук (Вера Григорьевна Подковырова).
- 24 октября 2024 г.— «Избушка на курьих ножках: истоки образа» (Дмитрий Александрович Баранов).
- 31 октября 2024 г.— «Александр Невский в отечественной культуре и исторической памяти» (Роман Александрович Соколов).
- 28 ноября 2024 г.— Экскурсия в Зимний дворец Петра I (Сергей Алексеевич Нилов).
- 6 февраля 2025 г.— Экскурсия в Исаакиевский собор и на экспозицию «Чтобы помнили» (Василий Олегович Яковлев).

- 27 февраля 2025 г. — «Духи-игрушки» (Элина Васильевна Арсеньева).
- 27 марта 2025 г. — Показ документального фильма «Судьба артиста» (к 80-летию Андрея Юрьевича Толубеева) (Елена Глебова Плугатырёва).
- 24 апреля 2025 г. — Музыкальный вечер (Фёдор Григорьев).
- 22 мая 2025 г. — Экскурсия в Музей мостов (Ирина Августиновна Трунова).
- 26 июня 2025 г. — Экскурсия в Музей специй.

Некоторые мероприятия видятся как начало тематических циклов (например, лекции сотрудников Государственного Эрмитажа и экскурсии в Эрмитаж). На некоторые вечера приглашались лекторы из других городов: Москвы, Архангельска. Кто-то из авторов выступал уже не по одному разу. В отдельных случаях ведущих наших вечеров объединяли родственные связи. К сожалению, нужно отметить, что Михаила Павловича Иванова, прочитавшего лекцию 27 января 2022 г., уже нет с нами, и мы склоняем голову в память о его научных достижениях и отзывчивости в адрес наших «Четвёртых четвергов».

Слова трепетной благодарности должны прозвучать и в адрес постоянных слушателей. Среди них — представители нашего Филиала, Санкт-Петербургского Государственного университета, Библиотеки академии наук, Санкт-Петербургского филиала Института истории естествознания и техники РАН, Института озероведения РАН, Государственного Эрмитажа, Государственного Русского музея и других учреждений. Мы открыты для всех, рады гостям и благодарны за ответные слова, звучащие после «Четвёртых четвергов».

Как известно, труден лишь первый шаг. А он преодолён. К дальнейшим испытаниям, пусть даже непредвиденным, мы готовы, потому что перед нами — широкое поле творческих планов. Пусть же им будет суждено осуществиться...

ИЗ ТВОРЧЕСТВА СОТРУДНИКОВ ФИЛИАЛА

Н.Е. Вольцингер

ПАМЯТИ ЛЕОНАРДА АМАЯКОВИЧА ОГАНЕСЯНА

Леонард Оганесян родился в 1926 г. Его отец был священником высокого ранга, мать — главным экономистом завода армянских вин. Службу по призыву он проходил в Забайкальском округе, где освоил специальность водителя и радиста, отличившись тем, что побил непосредственного начальника, вступившись за честь юной радистки. Его ожидал штрафной батальон, но дело замяли, пощадив горячего солдата.

Демобилизовавшись, он поступил на математико-механический факультет Ленинградского университета, окончил его, стремительно защитил диссертацию и был принят на кафедру математики Политехнического института. Здесь Леонард Амаякович тоже отличился, поставив в первую же экзаменационную сессию тридцать двоек и одну пятерку. Пришлось сменить место работы, и он перешел на должность зав. лабораторией вычислительной математики ЛОМИ АН...

В это время я работал техником в Отделе прогноза невских наводнений Океанографического института и решал одномерную задачу на логарифмической линейке по восемь часов каждый день. А у Оганесяна был сказочный Урал 1 — сто операций в секунду! Я пошел к нему.

— Я тебя знаю! Видел, как ты прыгал с трамплина в Кавголово — воскликнул он. Так завязалось наше знакомство, перешедшее в крепкую дружбу...

Доминантой личности Леонарда Амаяковича была чрезвычайная самобытность поступков и суждений. У него было всего несколько старых книг по математике, библиотек он не посещал, иностранных языков не знал. При этом он первым в мире, раньше Куранта, предложил вариационно-разностный метод решения эллиптических уравнений — вариант метода конечных элементов, создав новую школу. Эрудиция его была удивительна: он глубоко знал разделы физики, древнюю историю Греции, Рима и народов Востока; стоит упомянуть, что он играл на скрипке. Столь же поразительна была его любознательность. Как-то мы ехали в переполненном автобусе, и Леонард, увидев какую-то невзрачную башню, закричал: «Что это? Хочу знать!». Он мог поздно вечером разбудить Лайхтмана и затеять длинный спор, а затем перезвонить Боре, его сыну, действительно выдающемуся физику: «Я измучил твоего отца, а теперь помучаю тебя». В стремлении к истине ограничений для него не существовало.

Еще одной имманентной чертой его была чрезвычайная требовательность и к себе, и к сотрудникам. Меня это тоже коснулось. Я кончал мат.-мех. Университета заочно, и Леонард, будучи руководителем дипломной работы, поставил за нее четверку. Когда я доложил, один из членов Госкомиссии за протестовал: «Как можно за такую работу ставить четверку!» — и мне повысили оценку. Леонард тут же отыгрался на другом дипломнике, вскричав: «Эта задача решена, если не десять, то двадцать раз!».

Леонард любил горы. Несколько раз я брал его в нашу дружескую команду, лидером которой был Гелий Степанов — мастер Международного класса по альпинизму, неоднократный чемпион страны. Обычно мы останавливались в Приэльбрусье на базе Высокогорного нальчикского института, в коттедже его директора и выходили на простые радиальные маршруты. Однажды я обнаружил Леонарда, лежащего на пороге, часа в четыре утра, чуть начало светать. Он что-то писал на технической серой бумаге огрызком карандаша.

— Что ты пишешь? — спросил я в изумлении.

— Пишу учебник по теплотехнике для Ларисы. (Лариса, его вторая жена, училась в Текстильном институте).

— Неужели таких книг нет?

— Э..., они все плохие...

Вот так! В этом — весь Леонард.

Отличие от принятых норм проявлялось у него во всем, составляя органическую суть его натуры. Да и внешне он не походил на горвосходителя: у него был большой, очень большой живот. О таком животе надо говорить отдельно, что я и сделал в балладе «На Лекзыре».

*Так размышлял я на морене
И наблюдал, как лез вперед,
И страждал и воды, и тени,
И отдыха его живот.
Он был на леднике Лекзыра
Весомой зримой частью мира,
Он вытирал, он нависал,
Он тяготил, он содрогал,
Он составлял деталь кошмара,
В котором дико вознеслись,
Пронзив расплавленную высь,
Ужасные зубцы Светгара —
И представителем предстал
Ангармонических начал.
...попытайтесь
Представить все и угадайте,
Лишь подошел, что сделал он?
— Ну снял рюкзак и тоже сел,
— Как бы не так! Он... он запел!*

Что было мечтой Леонарда? Конечно, взойти на Эльбрус. Чтобы уклониться от рискованной затеи, я поставил невыполнимое условие: пойдём, если присядешь 30 раз со мной на плечах. Он выдержал испытание...

Мы поднялись на «Приют одиннадцати», откуда выходят на Эльбрус ночью. Начальник Спасательной службы Абдулла, увидев экипировку Леонарда, поцокал языком и принес свои бесценные японские пуховые штаны. Такое внимание было очень кстати, ибо погода была скверная; к тому же склон обледенел, и мне пришлось кое-где рубить ступени. Леонарду было чрезвычайно тяжело, и я вблизи вершины предложил спускаться, но он только мотнул головой. В высшей точке Европы он упал, сломал кисть руки и разодрал пуховые штаны. Ледорубом пользоваться он не мог, и мы спускались осторожно и медленно. Я уже бывал на Эльбрусе, тогда это заняло около восьми часов, в этот раз мы вернулись в «Приют» через двадцать часов. Абдулла уже собирался искать нас. Взглянув на свои разодранные японские штаны, он только махнул рукой — восточное благородство...

Времена изменились, и очень полезный Вычислительный центр ЛОМИ был переделан в очень бесполезный Институт социально-экономических проблем. Не смирившись с такой профанацией, Леонард перешел в наш институт. Одновременно к нам перешла из Университета и Нина Маслова. Она была лауреатом Госпремии по математике и премии им. Софьи Ковалевской. Не без удивления она говорила: «Мы с Леонардом думаем одинаково». Интересно было наблюдать за этим процессом. Отрешенно и пристально они смотрели в глаза друг другу, и Нина роняла: «Так вы решаете вариационную задачу?» — «В некотором смысле», — отвечал Леонард.

— А псевдодифференциальный оператор...

— Да, обратный эллиптическому, псевдолокален, в этом дело.

— В пространстве Шварца...

— Необязательно...

И они пристально смотрели в глаза друг другу, ничего не видя, находясь не здесь, в комнате, а в каком-то ином пространстве.

В заключение позволю себе привести сочинение, написанное по случаю семидесятилетия Леонарда Амаяковича.

«Семь городов пререкались за честь быть отчиной Гомера
Смирна, Итака, Родос, Афины, Хиос, Аргос, Саламин».

Эпиграмма

Про ту историю со школы знает каждый:

Семь городов какой-то спор вели однажды.

Из-за кого ругались, из-за какого-то грека,

Сейчас фамилию не помню человека.

Чем ворошиться нам в преданьи этом старом.
Сочтем и мы семь городов за юбиляром,
Семь городов мы обойдем его следами,
А уж куда придем — увидите вы сами.

ЛЕНИНАКАН воспеть бы на грабаре барду,
Ведь там случилось родиться Леонарду —
Хотя, наверное, более уместно
Назвать бы «Амаякан» такое место.

Сменить Гюмри на ЕРЕВАН семья решила
С Кизил-Богазы прямо вниз, как по чингилу...
И с той поры, чуть осень — тянет юбиляра
Возлезть на траверс ереванского базара.

Ведь вы и сами там, наверное, бывали,
Рехан, тархун и бадриджани повидали...
Ах, с непривычки эта яркая картина
Слепит глаза, как купола Эчмиадзина!

Но вам замечу, с точки зренья одессита,
На том базаре не хватает колорита,
А чтобы пахнул так товар и столько весил —
Найти возможно исключительно в Одессе!

У нас — уже не говоря за вкус арбуза —
Даже Самсону не поднять такого груза,
А помидоры — так арбузам тем на пару...
Но возвратимся, между прочим, к юбиляру.

В ИРКУТСКЕ в армии служил, сидел на «форде»,
Крутил баранку и сержанту дал по морде!
Под трибунал чуть не попал из-за радистки...
И потому Иркутск пусть будет в этом списке.

За ЛЕНИНГРАД, конечно, спорить я не буду
И бить, как греки, черепичную посуду —
Но что Одессы почему-то тут не видно,
Мне, одесситу, я скажу-таки, обидно!

Под пятым номером канадская столица.
На юбиляра претендует граница,
Он побывал — вы не слышали — в МОНРЕАЛЕ!
Но, между нами, где армяне не бывали...

Есть на Канарских островах местечек пара —
Рукой подать до них от Западной Сахары —
И если очень не пугает вас стихия,
Держите курс на островок Гран-Канария.

Шикарный город лижут волны океана,
Какие пляжи там! Какие рестораны!
Я лично сам, хоть не был там, но так послушать —
Макрель, конечно, не кефаль, но можно скушать.

Что до меня, то нету лучше ресторана,
Где приготовят вам севанского ишхана...
Но раз уж был он там, мед-пиво пил и виски,
ЛАС-ПАЛЬМАС тоже ведь не вычеркнешь из списка.

Седьмого города и называть не надо —
В него подъехали мы все из Ленинграда;
И здесь сидим, и тост заздравный поднимаем,
И здесь сердечно юбиляра поздравляем!

Конечно, жить и в ПЕТЕРГОФЕ тоже можно:
Тут телевизор починить совсем не сложно,
И до воды недалеко тут, и до лесу —
Но все же стоило б подумать за Одессу!

Давай же, милый, закругляй свои науки,
Ведь ты же мастер редкий — золотые руки!
Какие здесь, скажи, имеешь дивиденды
С этих твоих, как их, конечных элементов?

Ведь ты маляр, столяр, сантехник, слесарь, плотник —
Такой нам нужен позарез везде работник.
С тобой не нужно коллективного подряда,
Один заменишь сразу целую бригаду!

Еще бы мог я привести соображенья
Для подкрепленья делового предложенья —
Но опасуюсь заслужить ваш отзыв резкий,
Что был немного многословен, по-одесски...

Леонард Амаякович скончался в 2013 г. Годы сохранили яркий облик упорного и упрямого паладина науки, который всегда и везде опаздывал — ему не хватало времени, которым он щедро делился с многочисленными сотрудниками других институтов, приходившими со своими задачами — этого самородка, сверкающего гранями своего таланта, цельного и живого. В этом году ему исполнилось 100 лет.

ДРУЗЬЯМ ДЕТСТВА И ЮНОСТИ

Далёкое становится всё ближе.
Не знаю, почему, но снятся мне
Те ночи, когда вместе мы на крыше
Рассматривали звёзды в тишине.

Далёкое становится роднее.
Дороже взгляд учителя и мысль...
Да! Оказалось, было им виднее,
Когда учили, что такое жизнь.

Далёкое становится всё ярче,
Когда мы вспоминаем класс, друзей,
Что только ни творили мы за партой,
Вводили в стресс своих учителей.

Далёкое становится больше,
Когда все вместе за одним столом
Нальём бокал и, глаз поднять не смея,
Мы всех ушедших помянём добром.

Далёкое сегодня вместе с нами,
Хотя виски покрыты серебром.
И кажется, что мы другими стали,
Но детство всё ж друг в друге узнаём.

УЧИТЕЛЮ

*Клавдии Григорьевне Глуховцевой —
классному руководителю в 5–10 классах
школы № 4 г. Феодосии*

Мы помолчим и вспомним обо всём,
Чему она заботливо учила.
Жизнь промелькнула, будто вещей сон,
А сколько в этой жизни вместе было?

Она бранила нас, чтоб «чище» были мы,
Учила нас сочувствовать друг другу.
И исправляла двойки и колы —
В беде всем нам протягивала руку.

Наперекор судьбе могла за нас
Бороться с безразбором педсовета.
И ночью, не смыкая добрых глаз,
Переживала много раз всё это.

Склоняем головы и помним светлый лик —
Она уходит с журавлиной стаей.
Жизнь пролетела искрой, словно миг,
Горячий след в сердцах людей оставив.

Жизнь скоротечна, хоть была полна,
Полна любовью к Вам, любовью Вашей.
Пусть в небе вспыхнет новая звезда
И освещает светом Землю нашу.

ОДА КОЛЛЕГАМ

И грусти миг, и свет побед,
И суету в житейском беге —
Всё делим мы, мои коллеги.
Роднее вас, пожалуй, нет.

Подвластны нам наук экстрим
И инженерные начала.
И пусть, друзья мои, нас мало —
Мы верим, чувствуем, творим.

Когда ж бывает горячо,
И трудной видится дорога,
Мы знаем, что нас очень много:
Мы вместе, мы — к плечу плечо.

И пусть вокруг — страстей накал.
Но, вопреки интригам бранным,
Пускай живет благословенным
Санкт-Петербургский Филиал!

ТИМУРУ СУЛТАНОВИЧУ ШАОВУ

*к 60-летию
на мелодию его же песни «Разговор с критиком»
(песня была исполнена со сцены во время юбилейного концерта)*

Пусть наш дуэт нестроен, хил и тих,
Но это, Вы поверьте, от стеснения.
И мы пропеть решились Вам заздравный стих
По поводу дня Вашего рожденья.
Дня Вашего
Рождения,
Рожде-рожде,
Ния-ния.

Вы — мастер в песнях, нам — иной удел:
Мы постигаем сущность океана.
Совместной песни миг уже давно созрел,
Как синий плод красавца-баклажана.

Как синий плод,
Красивый плод
На радость всем
Давно созрел.

Однако ж славных планов этажи —
Чуть позже. Пожелания сначала:
Чтоб не кусали Вас подводные ежи,
И субмарина чтоб Вас охраняла!
Ежей долой
Ко всем чертям,
И только штиль
Без слёз и бурь!

АЛЕКСАНДРУ НИКОЛАЕВИЧУ ШИПТЕНКО

на мелодию песни «Аргентина — Ямайка»

Сегодня мы здесь собрались все вместе.
У нас во главе стола именинник.
Мы празднуем нашего чудесного Сашу
Сегодня.
Он родился в Одессе в день пионерский.
Он закончил Подплав имени Комсомола.
Он служил на Камчатке, он славный ракетчик
Наш Саша.

Вся в этом соль,
Вся в этом соль.
Александру сегодня
Пять ноль.

А теперь он с нами занимается морями.
Он ходит по ним в составе экспедиций.
Он был даже в Четвёртом Курильском проливе,
Так вышло.
Мы пожелаем Саше свершенья желаний,
Успехов всевозможных и крепкого здоровья,
Любви и процветанья, и всяческой удачи,
Конечно.

Вся в этом соль,
Вся в этом соль.
Александрю сегодня
Пять ноль.

Пусть будет ему время на футбольные матчи.
Пусть будут впечатленья от жизни во благо.
Пусть дочка его сделает дедом добродушным
Скорее.
Спасибо имениннику за это угощенье.
Хрустальный звон бокалов пусть души согреет.
Мы чествуем Сашу, мы Сашей гордимся,
Ещё бы!

Вся в этом соль,
Вся в этом соль.
Александрю сегодня
Пять ноль.

АЛЛЕ ВИКТОРОВНЕ БОРОВСКОЙ

на мелодию песни «Миллион алых роз»

Спет был однажды куплет.
Стал он народно любим.
Мы по прошествии лет
Алле его посвятим.
В нём и любовь, и хвала,
И уваженье друзей,
И ощущение тепла
В беге октябрьских дней.

Миллион, миллион, миллион нежных фраз
В этот день, в этот день, в этот день прозвучат.
Все слова, все цветы, все подарки — для Вас!
Пусть глаза Ваши восторгом горят.

Пусть Вас минует печаль
И огорченье ей вслед!
Пусть прозвучит наш рояль
Лозунгом вечных побед!
Сил Вам мечтать и творить!
Пусть и в жару, и в мороз
Каждый Вам хочет дарить
Свой миллион алых роз!

Миллион, миллион, миллион нежных фраз
В этот день, в этот день, в этот день прозвучат.
Все слова, все цветы, все подарки — для Вас!
Пусть глаза Ваши восторгом горят.

АНАТОЛИЮ АЛЕКСАНДРОВИЧУ РОДИОНОВУ

на мелодию песни «Атланты держат небо»

Пусть путь тернист и труден,
Порою мрачны дни,
Но есть на свете люди,
Атлантам кто сродни.
Их сила дарит веру,
Надежду и покой,
Они препятствий сферу
Несут любой ценой.

Такое нынче время —
Увы, дано не всем
Взвалить на плечи бремя
Общественных проблем,
Щитом стоять на страже
На каменном посту,
Не отступая даже,
Когда невмоготу.

Нести гранит науки
Непросто, говорят:
Отяжелеют руки,
Мудрее станет взгляд.
Но память человечья
Пускай благоволит
Сквозь жизни быстротечье
К несущим тот гранит.

АНАТОЛИЮ АЛЕКСАНДРОВИЧУ РОДИОНОВУ

по аналогии с литературным сборником «Парнас дыбом»

ЛЕРМОНТОВ (с его лирической историчностью)

— Скажи-ка, дядя, ведь недаром
Тот дом, что светится лидаром,
Построен прямо тут?
Я слышал: что-то здесь нечисто —
Сплошной простор для баталиста.
Иль люди просто врут?
— Да, верно, враг градозащитный
Устроил бой кровопролитный
(Противно вспоминать).
Но избран был победный вектор,
Ведь на коне был сам директор,
И все ему под стать.
Они дрались, подняв забрало,
И чудо восторжествовало —
Позорно враг бежал.
И вот наш повод веселиться —
Красивый дом под цифрой «тридцать» —
Спасённый Филиал!..

ГУМИЛЁВ (с его акмеистской нежностью)

Сегодня особенно томны Ваш взгляд и настрой,
Изящно сплетение рук. И сплетение ног.
Послушайте: где-то, по холсту картины одной
Изысканный бродит зверёк.
Его непонятен нам вид: то ли слон, то ли гусь.
И зданье за странной спиной не достойно похвал.
Однако же кто-то (назвать я его не берусь)
Узрел в этом здании наш дорогой Филиал.
Пусть тот, кто узрел, упивается бредом своим.
Пусть будет по-детски он козням содеянным рад.
А Вы устремите в горящие звёзды над ним
Ваш тонкий и нежный, Ваш мудрый, пронзительный взгляд...

ОКУДЖАВА (с его бардовской напевностью)

Виноградную косточку в нашем дворе закопаю.
Почему не взойдёт? Ерунда! Кто такое сказал?
Будем пить мы вино пусть не к марту, но точно уж к маю,
А иначе зачем наш директор воздвиг Филиал...
Разбегайся подальше от нас, городская защита!
Мы в тельняшках, нас много, и бред ваш нас сильно достал.
Не топчитесь, ведь здесь наша косточка где-то зарыта,
И совсем не для вас наш директор воздвиг Филиал...
Ах, избавь нас, Судьба, видеть впредь депутатские рожи,
Аргументов нелепейших слышать дурацкий накал.
Эти люди на бестий филоновских чем-то похожи —
Вопреки их усердью директор воздвиг Филиал...

МАЯКОВСКИЙ (с его безапелляционным футуризмом)

Стоял, никого не трогая,
Филиал института нашего.
Но набежали твари колченогие —
Градозащитники (мать вашу!).
Взяли Филонова на поруки.
«Скажи им, что флигель твой рядом.
Забираем мы всё в свои руки», —
Затянули они рулады.
Кипели б здесь свадьбы, застолыя,
Был бы хостел или даже псарня,
Кабы не позиция Анатолия —
Славного флотского парня...

АНАТОЛИЮ АЛЕКСАНДРОВИЧУ РОДИОНОВУ

настоящему островитянину

Васильевский остров... Отныне иначе
Вы видите путь свой с работы до дома.
Здесь город решает другие задачи,
Здесь время недвижно, здесь всё по-другому...

Васильевский остров... Колодцы и арки.
В них редкие блики и гулкие звуки...
Пусть Ваши идеи всегда будут ярки
И искренне служат Российской науке!

Васильевский остров... Отточенность линий.
Проспектов безудержная перспектива...
Пусть дни Ваши нежной звучат мандолиной!
Побольше Вам радости и позитива!

Васильевский остров... Нева и Смоленка.
И мысль о засыпанных прежде каналах...
Пусть жизнь Ваша в дивных сияет оттенках,
Как это шампанское в звонких бокалах!

Васильевский остров... Модерн и барокко.
И крылья мостов в распростёртых объятьях...
Творите, как Бог: вне пространства и срока!
Любви! Впечатлений! Мечтаний и счастья!

НАУМУ ЕВСЕЕВИЧУ ВОЛЬЦИНГЕРУ

на мелодию песни «Прощайте, скалистые горы»

Встречали Вас радостно горы,
Заснеженных шапок хрусталь,
Когда Вы неопытным взором
Искали свою вертикаль.
Они и теперь по Вам плачут,
Вы часто грустите по ним.
И будь Вы другим.., всё бы было иначе,
Но мир Вас не знает другим.

А ныне внимают Вам волны,
Кильватера гребень крутой,
Где вектор модельный наполнен
Движеньем пучины морской.
Любая под силу задача,
Любой переход одолим.
И будь Вы другим.., всё бы было иначе,
Но мы Вас не знаем другим.

На бойких учёных советах
Ваш голос даёт нам отсчёт.
Мы чувствуем в голосе этом
Опору для шага вперёд.
Не сразу все ясно. Тем паче
Мы бережно всё сохраним.
А будь Вы другим.., то всё было б иначе,
Но Вас не представить другим.

Для многих из нас Вы — учитель,
Надёжный и преданный друг,
Кто в самой суровой пучине
Добросит спасательный круг.
Все женщины видят Вас мачо,
Галантным, лихим, заводным.
А будь Вы другим.., мы б смотрели иначе,
Но мы Вас не видим другим.

Пройдя по белесым дорожкам
Васильевских снежных аллей,
Мы все добрались осторожно
На славный для нас юбилей.
В бокалах плескается чача,
И мы Вас поздравить хотим.
Но будь Вы другим.., всё могло быть иначе,
Но мы бы не пили с другим.

НАУМУ ЕВСЕЕВИЧУ ВОЛЬЦИНГЕРУ

на мелодию песни «Как здорово, что все мы здесь сегодня собрались»

Вот старый год растаял неясным белым шумом,
И новый объявился, откуда ни возьмись,
Поздравить с Днем Рождения Вольцингера Наума,
Как водится, в Крещение мы вместе собрались.

Кружась в лучах лидара, волна с волною пляшет,
К чему бы этот танец, — попробуй разберись.
И через сотню циклов твоя модель покажет:
К тому, чтобы в Крещение мы снова собрались.

И Пенелопа, млея, в объятых Одиссея,
И Моисей — тот самый, с которым вы сошлись,
Прислали поздравления тебе, Наум Евсеич,
Желают, чтоб в Крещение мы вместе собрались.

Немало слов, и тостов тебе красиво скажут,
Но наше исполнение судить не торопись.
Нам помогают звезды из Мариинки нашей,
С которыми в Крещение мы вместе собрались.

Загадывай же самые заветные желанья,
К мечтам своим и чаяньям ты смело обратись.
А мы, звеня бокалами, тебе и нам желаем,
Чтоб много раз, в Крещение, еще мы собрались.

НАУМУ ЕВСЕЕВИЧУ ВОЛЬЦИНГЕРУ

на мелодию песни «Домбайский вальс»

Лейся обилием строк,
Нашей души позитив!
Пусть откровенья залог —
Нежный Домбайский мотив.
Пусть ни тоска, ни недуг
Жизни не сломят структур!
Пусть будет ярким досуг,
Как завещал Эпикур...

Пусть оживёт, что спало
В самых заветных мечтах,
Тем, кто в сомненьях, назло,
Как завещал Фейербах...
Пусть ироничный подход
Жизни уменьшит накал!
Через проблемы — вперёд,
Как завещал Ювенал...

Пусть открывается путь
Тем, кто правдив и учён!
Мыслей досужих — ничуть,
Как завещал Сен-Симон...
Пусть Вам ничто не грозит!
Долгих и ярких Вам лет!
Счастье, что рядом горит
Ваш несгораемый свет!

**НАУМУ ЕВСЕЕВИЧУ ВОЛЬЦИНГЕРУ
И ЕЛЕНЕ КОНСТАНТИНОВНЕ МАТУСОВСКОЙ**

на мелодию песни «Эхо любви»

Спасибо, друзья, что мы здесь собрались
И даже поём вам со сцены.
Пусть наши слова устремляются ввысь
Во славу, во славу,
Во славу Наума с Еленой!
Во славу, во славу,
Во славу Наума с Еленой!

Вы нас вдохновили на главную суть:
Кто любит, те не одиноки,
Ведь только вдвоём можно в счастье шагнуть.
Науму с Еленой
Поём мы сейчас эти строки!
Науму с Еленой
Поём мы сейчас эти строки!

Вы нас научили труду и борьбе:
Не верить ни слухам, ни шуму

И быть благодарным коварной судьбе.
О Боги, о Боги,
Храните Елену с Наумом!
О Боги, о Боги,
Храните Елену с Наумом!

МАКСИМУ РОДИОНОВУ

Не верится, не мыслится и не осознаётся,
За что нам это страшное, невысказанное горе...
И сердце, так любимое, зачем оно не бьётся,
Такое окрылённое и светлое, как море...

Твой голос всюду слышится, родной и незабвенный.
Твой взгляд нас греет мудростью сквозь жизненные грозы...
С тобой пребудет в вечности твой ангел сокровенный,
А с нами — память долгая и искренние слёзы.

К ДВАДЦАТЬ ТРЕТЬЕМУ ФЕВРАЛЯ

посвящение мужчинам

И снова пришёл этот праздник. И снова
Мы здесь собрались и подняли бокал.
И то, что мы скажем, быть может, не ново.
Но важно, как самый святой ритуал.

Нет в наших словах ни подвоха, ни лести.
В них — гордость, в них — нежность, в них — правда лучом,
В них — радость, что все мы по-прежнему вместе,
В них — счастье укрыться за вашим плечом.

Вы — наша защита, вы — наша подмога.
Успехов вам, счастья, здоровья и благ!
Поддержки от близких, поддержки от Бога!
Уюта вам в ваш сокровенный очаг!

Творить вам — от сердца! Держаться вам крепче!
Идеями пусть восхищают умы!
А чтобы жилось вам немножечко легче —
Для этого, видимо, созданы мы...

К ВОСЬМОМУ МАРТА

по аналогии с литературным сборником «Парнас дыбом»

ГУМИЛЁВ

Сегодня особенно тонок и томен твой взгляд.
Какие там буйность идей, вольнодумство и злость!
Послушай: с далекого, синего озера Чад
Привез я тебе от жирафа пятнистого кость.
Поверь, милый друг, я не ведаю: лапа иль хвост,
И как простиралась внутри сухожильная нить.
Но ты восприми этот дар под сиянием звезд,
А я обещаю всю жизнь тебя нежно любить.

БЛОК

Мы каждый вечер в час назначенный
(Припомни, светлая душа),
Дневной заботой озадачены,
Вино вкушаем, не спеша.
Вот и сегодня: шляпа с перьями...
И я, стряхнув былую пыль,
Вздыхая древними поверьями,
Преподношу тебе бутыль.
Что там — неважно. Пусть же мистика
Отсрочит сладостный ответ.
Мы — предадимся же софистике:
In vino veritas, мой свет.

ЕСЕНИН

Мне осталась одна забава
После прежних десятков тыщ:
Вас, красоток, вокруг — орава,
Я ж один, я — поэт, я нищ.
Мне бы в дар вам далекие дали,
Но не сладилось, не сбылось.
Видно, много я наскандалил,
Много делал я «на авось».
Я б вам Солнце дал — оно ярче.
Свет Луны — он забвенно тих.
Но придётся идти иначе:
Вот подарок мой. Этот стих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Океан и атмосфера в исследованиях Санкт-Петербургских океанологов. К 50-летию Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук / Под ред. А. А. Родионова, Д. В. Чаликова. СПб.: Нестор-История, 2016. 152 с.
2. Океан и атмосфера в исследованиях Санкт-Петербургских океанологов. К 55-летию Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. 206 с.
3. *Chalikov D.* Numerical modeling of sea waves. Springer, 21. 216 p. (eBook).
4. *Chalikov D.* High-Resolution Numerical Simulation of Surface Wave Development under the Action of Wind // *Ocean Wave Studies, Ocean Sci.* 2018. 14. P. 453–470. DOI: 10.5194/os-14-453-2018 EDN: YCERRB
5. *Chalikov D., Rainchik S.* Coupled Numerical Modelling of Wind and Waves and the Theory of the Wave Boundary Layer // *Boundary-Layer Meteorol.* 2011. Vol. 138. P. 1–41. DOI: 10.1007/s10546-010-9543-7 EDN: OHTVBH
6. *Hasselmann K., Barnett R. P., Bouws E.* et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint Sea Wave Project (JONSWAP) // *Tsch. Hydrogh.* 1973. Z. Suppl. A8(12), p. 1–95.
7. *Benjamin T. B., Feir J. E.* The Disintegration of Wave Trains in Deep Water // *J. Fluid. Mech.* 1967. Vol. 27. P. 417–430. DOI: 10.1017/S002211206700045X
8. *Chalikov D.* Simulation of Benjamin-Feir instability and its consequences // *Physics of Fluid*, 2007. 19, 016602-15. DOI: 10.1063/1.2432303 EDN: MDTMTT
9. *Chalikov D.* Freak waves: their occurrence and probability // *Phys of Fluid*. 2009. Vol. 21. 076602. DOI: 10.1063/1.3175713 EDN: MWYJEX
10. *Tolman H. L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note, 2009. 276. 194 pp.
11. *Фокина К. В., Чаликов Д. В.* Численное исследование статистических характеристик развивающегося волнения // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. Т. 24. ES2010. DOI: 10.2205/2024ES000878 EDN: SNFMC1
12. *Чаликов Д. В., Булгаков К. Ю., Фокина К. В.* Интерпретация результатов расчетов со спектральной моделью прогноза волн с помощью фазо-разрешающей модели // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16, № 2. С. 21–33. DOI: 10.59887/2073-6673.2023.16(2)-2 EDN: PHSGLK
13. *Каган Б. А., Тимофеев А. А.* Определение диссипации бароклинной приливной энергии и связанного с ней коэффициента диапикнической диффузии как первый шаг оценивания роли приливных эффектов в формировании климатических характеристик моря Лаптевых // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 4. С. 39–49. DOI: 10.7868/S2073667320040048 EDN: PQSSLR
14. *Каган Б. А., Софьина Е. В.* Влияние приливного диапикнического перемешивания на климатические характеристики моря Лаптевых в безледный период // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 2. С. 218–234. DOI: 10.22449/0233-7584-2022-2-218-234 EDN: KVHDUM

15. *Вольцингер Н. Е., Андросов А. А.* Моделирование длинноволновой негидростатической динамики на горном рельефе. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 170 с.

16. *Родионов А. А., Ванкевич Р. Е., Клеванная М. К., Вольцингер Н. Е.* Моделирование баротропной приливной динамики Курильского региона // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 1. С. 23–38. DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(1)-2 EDN: HUKDKU

17. *Androsov A., Fofonova V., Kuznetsov I. et al.* FESOM—C v.2: coastal dynamics on hybrid unstructured meshes // *Geoscientific Model Development*. 2019. Vol. 12. P. 1009–1028. DOI: 10.5194/gmd-12-1009-2019 EDN: SDGPOH

18. *Ефимов В. В., Куликов Е. А., Рабинович А. Б., Файн И. В.* Волны в пограничных областях океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 280 с.

19. *Романенков Д. А., Софьина Е. В., Родикова А. Е.* Моделирование баротропного прилива у юго-восточного побережья п-ва Камчатка с учетом точности глобальных приливных моделей в северо-западном регионе Тихого океана // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16, № 4. С. 45–62. DOI: 10.59887/2073-6673.2023.16(4)-4 EDN: XTLTBK

20. *Сеин Д. В., Дворников А. Ю., Мартыанов С. Д., Кабос У., Рябченко В. А., Греггер М., Мишра А. К., Кумар П., Горчаков В. А.* Влияние обратной связи «температура воды — фитопланктон» на температуру верхнего слоя Индийского океана // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 4. С. 64–76. DOI: 10.7868/S2073667321040067 EDN: OGDDBY

21. *Sein D. V., Dvornikov A. Y., Martyanov S. D., Cabos W., Ryabchenko V. A., Gröger M., Jacob D., Kumar Mishra A., and Kumar P.* Indian Ocean marine biogeochemical variability and its feedback on simulated South Asia climate // *Earth Syst. Dynam.* 2022. Vol. 13. P. 809–831. DOI: 10.5194/esd-13-809-2022 EDN: BZHPQU

22. *Mishra A. K., Kumar P., Dubey A. K., Javed A., Saharwardi M. S., Sein D. V., Martyanov S. D., Jacob D.* Impact of horizontal resolution on monsoon precipitation for CORDEX-South Asia: A regional earth system model assessment // *Atm. Res.* 2021. Vol. 259, 105681. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105681 EDN: AYILVE

23. *Kumar A. D., Lal P., Kumar P., Kumar A., Dvornikov A. Y.* Present and future projections of heatwave hazard-risk over India: A regional earth system model assessment // *Environmental Research*. 2021. Vol. 201. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111573 EDN: NDHSDJ

24. *Sein D. V., Martyanov S. D., Dvornikov A. Y., Cabos W., Ryabchenko V. A., Mishra A. K., Limareva N., Alekseeva E., Jacob D., Kumar P.* Future climate change in the Northern Indian Ocean as simulated with a high-resolution regional earth system model // *Climate Dynamics*. 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2017171/v1

25. *Kumar P., Dinesh A. S., Mishra A. K., Pandey L. K., Sein D. V., Ryabchenko V.* Marine heatwaves intensification, expansion and departure into the permanent state over the Tropical Indian Ocean: a Regional Earth System Model assessment // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2023. 101408. P. 0377-0265. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2023.101408 EDN: YSSOPG

26. *Исаев А. В., Савчук О. П., Филатов Н. Н.* Диагноз состояния экосистемы Ладожского озера и прогноз изменений при возможном изменении климата на основе математического моделирования биогеохимических потоков вещества // *Современ-*

ное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. М.: РАН, 2021. С. 501–503.

27. *Isaev A. V., Savchuk O. P., Filatov N. N.* Three-Dimensional Hindcast of Nitrogen and Phosphorus Biogeochemical Dynamics in Lake Onego Ecosystem, 1985–2015. Part I: Long-Term Dynamics and Spatial Distribution // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022. Vol. 15, No. 2. P. 76–97. DOI: 10.48612/fpg/e1m2-63b5-rhvg EDN: BOSGAU

28. *Savchuk O. P., Isaev A. V., Filatov N. N.* Three-Dimensional Hindcast of Nitrogen and Phosphorus Biogeochemical Dynamics in Lake Onego Ecosystem, 1985–2015. Part II: Seasonal Dynamics and Spatial Features; Integral Fluxes // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022. Vol. 15, No. 2. P. 98–109. DOI: 10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8 EDN: EFLGGX

29. *Филатов Н. Н., Савчук О. П., Баклагин В. Н., Галахина Н. Е., Зобков М. Б., Исаев А. В., Кондратьев С. А., Калинин Н. М., Новикова Ю. С., Расулова А. М., Шмакова М. В.* Диагноз состояния и изменений экосистемы Онежского озера и водосбора на основе информационно-аналитической системы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 2. С. 10–24. DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(2)-2 EDN: PQWCUE

30. *Исаев А. В., Рябченко В. А., Коник А. А.* Воспроизведение современного климатического состояния экосистемы Ладожского озера // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 2. С. 50–65. DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(2)-5 EDN: MWTKC

31. *Исаев А. В., Рябченко В. А.* Модельные оценки межгодовой изменчивости характеристик экосистемы Ладожского озера в период с 1980 по 2020 годы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 4. С. 32–42. DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-2 EDN: EHTXVP

32. *Martyanov S. D.* High-Resolution Modeling of the Kara Sea Dynamics and Thermohaline Structure and Assessment of the Impact of Various River Runoff Forcing in the Model // *Water Resources*, 2024. Vol. 50. S323–S327. DOI: 10.1134/S0097807823700525 EDN: WVRJDI

33. *Глухов В. А., Гольдин Ю. А., Глитко О. В., Аглова Е. А., Глуховец Д. И., Родионов М. А.* Лидарные исследования в первом этапе 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2023. Т. 16, № 4. С. 107–115. DOI: 10.59887/2073-6673.2023.16(4)-9 EDN: HIBXYI

34. *Glukhov V. A., Goldin Yu. A., Glitko O. V., Glukhovets D. I., Aglova E. A., Rodionov M. A.* Investigation of the Relationships between the Parameters of Lidar Echo Signals and Hydrooptical Characteristics in the Western Kara Sea // *Oceanology*. 2023. Vol. 63 (Suppl 1). P. S119–S130. DOI: 10.1134/s0001437023070044 EDN: ZXMTFQ

35. *Глухов В. А., Гольдин Ю. А., Глитко О. В., Глуховец Д. И., Родионов М. А.* Сопоставление информативности ортогонально поляризованных компонент лидарного эхо-сигнала для оценки гидрооптических характеристик приповерхностного слоя // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 3. С. 32–43. DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(3)-3 EDN: DEOVKB

36. *Glukhov V. A., Goldin Yu. A., Glitko O. V., Aglova E. A., Rodionov M. A.* The use of polarization lidar for the registration of horizontal spatial distributions of seawater beam attenuation coefficient // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2024. Vol. 3 (S1). P. S162–S168. DOI: 10.1134/S1024856024701446 EDN: MVERRL

37. *Глухов В. А., Гольдин Ю. А., Родионов М. А.* Лидарный метод регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 3. С. 86–97. DOI: 10.7868/S2073667321030084 EDN: FZLYDG

38. *Глухов В. А., Гольдин Ю. А., Жегулин Г. В., Родионов М. А.* Комплексная обработка данных лидарной съемки морских акваторий // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 27–42. DOI: 10.59887/fpg/26nu-3hte-3n48 EDN: DCRZFG

39. *Rodionov A. A., Malova T. I., Rodionov M. A.* Optics of the atmosphere and ocean in the research of Leningrad and St. Petersburg oceanologists // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2024. Vol. 3 (S1). P. S162–S168. DOI: 10.1134/S1024856024701586 EDN: SYWUAD

40. *Глухов В. А., Гольдин Ю. А.* Морские радиометрические лидары и их использование для решения океанологических задач // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 1. С. 104–128. DOI: 10.59887/2073–6673.2024.17(1)-9 EDN: YMUPXI

41. *Зимин А. В., Романенков Д. А., Коник А. А., Атаджанова О. А., Свергун Е. И., Варкентин А. И., Тепнин О. Б.* Разномасштабная вихревая динамика на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2024. № 3. С. 16–35. EDN: VPBEOU

42. *Коник А. А., Зимин А. В., Атаджанова О. А., Педченко А. П.* Оценка изменчивости характеристик Стоковой фронтальной зоны Карского моря на основе комплексирования данных спутникового дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 2. С. 241–250. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250 EDN: KQWEVВ

43. *Коник А. А., Зимин А. В., Козлов И. Е.* Пространственно-временная изменчивость характеристик Полярной фронтальной зоны в Баренцевом море в первые два десятилетия XXI века // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 4. С. 39–51. DOI: 10.7868/S2073667321040043 EDN: GSFВH5

44. *Коник А. А., Зимин А. В.* Пространственно-временная изменчивость характеристик арктической фронтальной зоны в Баренцевом и Карском морях в летний период года в первые два десятилетия XXI века // *Морской гидрофизический журнал*, 2022. Т. 38, № 6. С. 679–693. DOI: 10.22449/0233-7584-2022-6-679-693 EDN: BSJBNO

45. *Коник А. А., Зимин А. В., Атаджанова О. А.* Пространственно-временная изменчивость характеристик Стоковой фронтальной зоны в Карском море в первые два десятилетия XXI века // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 4. С. 23–41. DOI: 10.59887/fpg/38mu-zda7-dper EDN: VUJBMN

46. *Коник А. А., Зимин А. В., Атаджанова О. А., Осадчиев А. А.* Точность спутниковой солености NASA/SMAP в районе внешней границы плюма Оби-Енисея (стоко-

вая фронтальная зона) в Карском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 4. С. 9–19. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-9-19 EDN: SRYHNI

47. *Коник А. А., Атаджанова О. А.* Изменчивость десятилетних горизонтальных термохалинных градиентов на поверхности Баренцева моря в летние сезоны 1993–2022 годов // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 51–64. EDN: BSCNRJ

48. *Коник А. А., Зимин А. В.* Многолетняя изменчивость поверхностных проявлений вихрей в Карском море // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2024. Т. 69, № 2. С. 356–371. DOI: 10.21638/spbu07.2024.208 EDN: KFTMPJ

49. *Максимовская Т. М., Зимин А. В., Моисеев Д. В.* Результаты океанографических исследований в прикромочной зоне Баренцева моря весной 2023 года // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 4. С. 87–93. DOI: 10.59887/2073-6673.2023.16(4)-7 EDN: SKMGYP

50. *Maksimovskaya T. M., Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Konik A. A., Moiseev D. V.* Variability of Water Characteristics in the Northeastern Part of the Greenland Sea during the Winter Periods in 2019–2023 // Physical Oceanography. 2025. Vol. 32, No. 2. P. 174–186. EDN: CVZPHS

51. *Gordeeva S., Zinchenko V., Koldunov F., Raj R. P., Belonenko T.* Statistical analysis of long-lived mesoscale eddies in the Lofoten basin from satellite altimetry // Advances in Space Research (includes COSPAR information bulletin), 2021. Vol. 68, No. 2. P. 364–377. DOI: 10.1016/j.asr.2020.05.043 EDN: LFUFPT

52. *Kozlov I. E., Atadzhanova O. A.* Eddies in the Marginal Ice Zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR Observations in Winter // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, No. 1. 134. DOI: 10.3390/rs14010134 EDN: BDQIPR

53. *Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., Zimin A. V.* Internal Solitary Waves in the White Sea: Hot-Spots, Structure, and Kinematics from Multi-Sensor Observations // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, No. 19. 4948. DOI: 10.3390/rs14194948 EDN: FUMMQV

54. *Атаджанова О. А., Зимин А. В., Круглова К. А.* Особенности поверхностных проявлений малых вихрей в Беринговом море в летний сезон по данным спутниковых радиолокационных изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 3. С. 270–278. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-270-278 EDN: OXDKHG

55. *Зимин А. В., Атаджанова О. А., Коник А. А., Круглова К. А.* Малые вихревые структуры Берингова моря и шельфа Курило-Камчатского региона по данным спутниковой радиолокации за теплый период 2020–2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 4. С. 239–249. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-239-249 EDN: IQUPQI

56. *Зимин А. В., Атаджанова О. А., Благодатских Е. А., Коник А. А., Филатов Н. Н., Родионов А. А.* Субмезомасштабные вихревые структуры Ладожского озера по радиолокационным данным Sentinel-1 за теплый период 2019–2022 гг. // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2024. Т. 514, № 2. С. 350–355. DOI: 10.31857/S2686739724020201 EDN: ABSCUS

57. *Свергун Е. И., Зимин А. В., Лазуткина Е. С.* Характеристики проявлений короткопериодных внутренних волн Курило-Камчатского региона по данным спутниковых наблюдений в летний период // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 1. С. 106–115. DOI: 10.7868/S2073667321010111 EDN: MLHPGX

58. *Свергун Е. И., Козлов И. Е.* Характеристики короткопериодных внутренних волн в Беринговом море летом 2019 г. по данным Sentinel-1 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 3. С. 269–276. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-269-276 EDN: CQJNTJ

59. *Свергун Е. И., Зимин А. В., Жегулин Г. В.* Наблюдения внутренних волн второй моды в Белом и Баренцевом морях // *Морской гидрофизический журнал*. 2022. Т. 38, № 2 (224). С. 185–195. DOI: 10.22449/0233-7584-2022-2-185-195 EDN: ZBAISA

60. *Свергун Е. И., Зимин А. В., Романенков Д. А., Софьина Е. В.* Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах с интенсивной приливной динамикой // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2022. Т. 58, № 6. С. 690–705. DOI: 10.31857/S0002351522060165 EDN: BJQRWC

61. *Свергун Е. И., Коник А. А., Родионов А. А., Зимин А. В.* Короткопериодная изменчивость гидрофизических полей и процессов в Четвертом Курильском проливе по данным экспедиционных исследований // *Подводные исследования и робототехника*. 2022. № 4 (42). С. 53–61. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_05 EDN: IHVDEO

62. *Свергун Е. И., Зимин А. В., Коник А. А.* Короткопериодные внутренние волны на тихоокеанской акватории полуострова Камчатка и северных Курильских островов по данным спутниковых радиолокационных наблюдений 2017–2021 гг. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024. Т. 21, № 2. С. 251–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-251-260 EDN: JGWPJZ

63. *Svergun E. I., Sofina E. V., Zimin A. V., Kruglova K. A.* Seasonal variability of characteristics of nonlinear internal waves in the Kuril-Kamchatka region by Sentinel 1 data // *Continental Shelf Research*. 2023. Vol. 259. 104986. DOI: 10.1016/j.csr.2023.104986 EDN: DHPERM

64. *Svergun E. I., Zimin A. V., Motyzhev S. V., Lunev E. G., Tolstosheev A. P., Volikov M. S.* Measuring the Characteristics of Short-Period Internal Waves Using an Array of Drifting Thermoprofiling Buoys // *Physical Oceanography*. 2025. Vol. 32, No. 3. P. 187–196.

65. *Гольмшток А. Я.* Некоторые замечания о фазовом превращении газогидратов в пористых осадках при отрицательной по Цельсию температуре // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16, № 4. С. 94–106. DOI: 10.59887/2073-6673.2023.16(4)-8 EDN: EDDXEC

66. *Малеханов А. И., Коваленко В. В., Никитин Д. А., Сазонтов А. Г., Сергеев В. А.* Согласованная со средой обработка акустических сигналов в подводных звуковых каналах: состояние исследований, оценки эффективности, перспективы // *Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб.: ЛЕМА, 2023. С. 17–23. EDN: CSUQVD

67. *Сергеев В. А., Родионов А. А., Малеханов А. И., Никитин Д. А., Ванкевич Р. Е., Демин С. П., Кулинич В. В.* Компьютерное моделирование согласованной со средой обработки гидроакустических сигналов // *Труды Всероссийской конференции «При-*

кладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. С. 26–30. EDN: VMLDUP

68. *Никитин Д. А., Родионов А. А.* Локализация движущегося подводного источника широкополосного шума на основе его пространственно-скоростных портретов в частотной области // Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ЛЕМА, 2023. С. 287–290. EDN: GYQXFL

69. *Родионов А. А., Никитин Д. А.* Метод оценки параметров внутренних волн на основе просветной гидроакустики. Результаты численного моделирования // Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. С. 191–195. EDN: XTRFBI

70. *Свергун Е. И., Зимин А. В.* Короткопериодные внутренние волны на шельфе Камчатского полуострова осенью 2018 года: сравнительный анализ результатов экспедиционных и спутниковых наблюдений // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. 2019. С. 155–156.

71. *Родионов А. А.* Основы гидрофизики океана. СПб.: ВМА им. Н. Г. Кузнецова, 1994.

72. *Родионов А. А., Зимин А. В., Никитин Д. А., Филлин К. Б.* Модельные исследования влияния направленности излучателя на формирование гидроакустического поля в реальном волноводе с внутренними волнами // Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ЛЕМА, 2018. С. 208–210. EDN: XZYKDR

73. *Родионов А. А., Ванкевич Р. Е., Лобанов А. А., Глитко О. В., Шпилев Н. Н.* Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН для моделирования гидрофизических процессов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-7 EDN: TIKUEN

74. *Арабаджи В. В., Богатырев С. Д., Баханов В. В., Казаков В. И., Коротков Д. П., Серин Б. В., Таланов В. И., Шишкина О. Д.* Лабораторное моделирование гидрофизических процессов в верхнем слое океана (большой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН) // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: сборник научных трудов / под ред. Е. Н. Пелиновского, В. И. Таланова. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. Т. 2. С. 231–251.

75. *Грязнов В. Л., Полежаев В. И.* Исследование некоторых разностных схем и аппроксимаций граничных условий для численного решения уравнений тепловой конвекции: препринт. М.: ИПМ АН СССР, 1974. 71 с.

76. *Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А.* Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: «Наука», 1984. 288 с.

77. *Белоцерковский О. М.* Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: «Наука», 1984. 520 с.

78. *Пейре Р., Тейлор Т. Д.* Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 352 с.

79. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/v1912/doc/guide-turbulenceles-smagorinsky.html>. Электронный ресурс (дата обращения: 30.08.2024).

80. *Patankar S. V.* Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publ. Corp., New York, 1980.

81. OpenFOAM Foundation. 2024. [Electron. resource]. <https://openfoam.org/> [Accessed: 2024–08–30].

82. *Родионов А. А., Никитин Д. А., Филин К. Б., Шпилев Н. Н., Паничева Е. Д.* Гидроакустический заглушенный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 4. С. 109–121. DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(4)-9 EDN: CQXLVP

83. *Родионов А. А., Тимофеев С. С., Ващилин А. А., Малова Т. И.* Здание Санкт-Петербургского филиала Института океанологии на Васильевском острове. История и современность. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. 71 с. EDN: SFUMOU

84. Акт государственной историко-культурной экспертизы выявленного объекта культурного наследия «Дом Долгоруковых», расположенного по адресу: Санкт-Петербург, Василеостровский район, 1-я линия, 30, ул. Репина, 31. СПб.: Архитектурная мастерская Т. А. Славиной, 2012. 140 с.

85. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. Т. Ха («Десмургия — Домициан»), 1893. С. 920.

86. Большая российская энциклопедия. Т. 9 («Динамика атмосферы — Железнодорожный узел»), 2007. 767 с.

87. *Николаева М. В.* Санкт-Петербург Петра I: история дворовладений: застройка и застройщики. М.: Прогресс-Традиция, 2014. 1000 с.

88. РГАДА. Ф. 248. Кн. 200. Л. 166–218 об.

89. https://ru.ruwiki.ru/wiki/Vladimir_Petrowitch_Dolgorouky.jpg. Электронный ресурс (дата обращения: 24.10.2024 г.).

90. РГАДА. Ф. 285. Оп. 1. Д. 917. С. 14–17.

91. <https://bsk.nios.ru/enciklopediya/dolgorukov-mihail-vladimirovich?ysclid=m2n5yz8e2g748081649>. Электронный ресурс (дата обращения: 24.10.2024 г.).

92. https://yandex.ru/images/search?from=tabbar&img_url=https%3A%2F%2Fi.yarx.cc%2FMcFVQ.jpg&lr=2&pos=9&rpt=simage&text. Электронный ресурс, (дата обращения: 24.10.2024 г.).

93. Санкт-Петербургские ведомости, 3 августа 1738. С. 8, [496].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

А. А. Родионов — член-корреспондент РАН, руководитель научного направления «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

А. А. Лобанов — доктор технических наук, директор Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Б. А. Каган — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Д. В. Чаликов — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Н. Е. Вольцингер — старший научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Д. А. Романенков — кандидат географических наук, заведующий Лабораторией численных экспериментов по динамике океана Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Е. В. Софьина — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

В. А. Рябченко — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

А. Ю. Дворников — кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией моделирования океанских биогеохимических циклов Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Т. И. Малова — кандидат географических наук, учёный секретарь Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

В. А. Глухов — кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией оптики океана и атмосферы Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

А. Я. Гольмшток — кандидат физико-математических наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

А. В. Зимин — доктор географических наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Р. Е. Ванкевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

С. А. Мальков — кандидат технических наук, начальник Центра прикладных гидрофизических исследований Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

К. Б. Филин — начальник Лабораторного комплекса Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Д. А. Никитин — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Н. Ф. Калашников — заместитель начальника Центра прикладных гидрофизических исследований Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
<i>ГЛАВА 1. ДИНАМИКА ОКЕАНА</i>	8
<i>ГЛАВА 2. ОКЕАНИЧЕСКИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ</i>	30
<i>ГЛАВА 3. ОПТИКА ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ</i>	41
<i>ГЛАВА 4. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОГРАНИЧНЫЕ СЛОИ</i>	50
ГЛАВА 5. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ГИДРОФИЗИКИ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВИХРЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В МОРСКОЙ СРЕДЕ	64
5.1. Центр прикладных гидрофизических исследований	64
5.2. Лабораторный научно-исследовательский комплекс.....	73
<i>ГЛАВА 6. ИЗУЧЕНИЕ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ В ЭКСПЕДИЦИЯХ</i>	84
<i>ГЛАВА 7. ТРИСТА ЛЕТ ЗДАНИЮ НА ПЕРВОЙ ЛИНИИ</i>	93
<i>ГЛАВА 8. «ЧЕТВЁРТЫЕ ЧЕТВЕРГИ НА ПЕРВОЙ ЛИНИИ»</i>	100
<i>ГЛАВА 9. ИЗ ТВОРЧЕСТВА СОТРУДНИКОВ ФИЛИАЛА</i>	104
ЛИТЕРАТУРА.....	123
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	131

Научное издание

**ОКЕАН И АТМОСФЕРА В ИССЛЕДОВАНИЯХ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИХ ОКЕАНОЛОГОВ**

**К 60-ЛЕТИЮ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ФИЛИАЛА
ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

*Под редакцией
члена-корреспондента РАН А.А. Родионова*

Компьютерная верстка Е.А. Типцовой

Распространяется бесплатно.

Подписано в печать 10.12.25. Формат 70×100 1/16.
Усл. печ. л. 10,75. Тираж 200 экз. Заказ 803.

Издательство СПбГЭУ. 191023, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, 30-32, литер А

Отпечатано на полиграфической базе СПбГЭУ