

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ТРУДЫ

Федерального государственного бюджетного учреждения
«Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт»
(ФГБУ «ДВНИГМИ»)

Выпуск 157

**ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



Владивосток
Дальнаука
2024

Редакционная коллегия:

канд. геогр. наук **Е.М. Вербицкая** (ответственный редактор),
канд. биол. наук **Т.А. Белан**, канд. геогр. наук **Л.И. Мезенцева**,
канд. геогр. наук **Ю.В. Любичский**, главный специалист **М.М. Асташкина**

Рецензенты статей (в алфавитном порядке):

А.Н. Бугаец (канд. техн. наук), **Л.Н. Василевская** (канд. геогр. наук),
Е.М. Вербицкая (канд. геогр. наук), **Ю.Н. Волков** (канд. физ.-мат. наук),
Ю.А. Гладышева (канд. биол. наук), **А.Ю. Звягинцев** (д-р биол. наук),
М.Я. Здерева (канд. геогр. наук), **В.В. Крохин** (канд. геогр. наук),
В.Б. Лобанов (канд. геогр. наук), **Ю.В. Любичский** (канд. геогр. наук),
Л.И. Мезенцева (канд. геогр. наук), **Л.В. Остроумов** (канд. техн. наук),
В.М. Пищальник (д-р техн. наук), **Г.В. Шевченко** (д-р физ.-мат. наук)

Гидрометеорология и экология Дальневосточного региона Российской Федерации

// Труды ДВНИГМИ. – Вып. 157. – Владивосток: Дальнаука, 2024. – 204 с.

ISBN 978-5-8044-

В настоящем сборнике ДВНИГМИ опубликованы работы, выполненные преимущественно в рамках Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. Статьи посвящены основным направлениям деятельности ФГБУ «ДВНИГМИ» в области метеорологии, гидрологии моря и водных объектов суши, а также экологии Дальневосточного региона России.

В сборнике представлена оценка текущего состояния и перспектив развития системы численного прогнозирования тропических циклонов, а также результаты исследований по прогнозированию опасных для авиации метеорологических явлений на основе продукции региональных численных моделей прогноза погоды.

В статьях по метеорологии анализируются долгосрочные изменения атмосферной циркуляции на Дальнем Востоке в последние десятилетия. Рассмотрены атмосферные процессы и погодные условия в Приморском крае в августе 2023 г.

В цикле статей по морской гидрологии представлены работы по морским наводнениям на побережье ДВ-морей, поверхностным течениям в прибрежных районах полуострова Камчатка. Оценивается цунамиопасность побережья залива Петра Великого в Японском море. Приводится сравнение изменений уровня моря различными измерительными средствами и качество карт объективного анализа высот волн. По гидрологии суши изложен методический подход к расчету допустимых погрешностей уровня рек для определения оправдываемости прогнозов дождевых паводков на реках Приморья.

Завершают сборник статьи экологического мониторинга таксономических групп макрозообентоса и его состояние на акватории морского порта Владивосток.

Сборник представляет интерес для специалистов в области метеорологии, океанологии и экологии.

Издается по решению Ученого совета ДВНИГМИ

ОГЛАВЛЕНИЕ

МЕТЕОРОЛОГИЯ

<i>В.В. Крохин.</i> Текущее состояние и перспективы развития системы прогнозирования тропических циклонов ФГБУ «ДВНИГМИ»	4
<i>Е.М. Вербицкая, С.О. Романский, В.В. Крохин.</i> Прогноз опасных для авиации явлений погоды на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России	18
<i>Е.М. Вербицкая, С.О. Романский.</i> О качестве прогнозов новой системы краткосрочного численного прогнозирования погоды «Хаб-5» в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока	41
<i>Л.И. Мезенцева, Н.И. Друзь, Л.В. Гончуков.</i> Тенденции изменения элементов атмосферной циркуляции на Дальнем Востоке в последние десятилетия	58
<i>Л.И. Мезенцева, Н.В. Глубоков, Н.Г. Котович, Т.А. Перунова.</i> Синоптические аспекты атмосферных процессов и погодных условий на территории Приморского края в августе 2023 г.	70

ОКЕАНОЛОГИЯ

<i>А.Н. Вражкин.</i> Качество карт объективного анализа высот волн	81
<i>Ю.В. Любичкий, А.Н. Вражкин.</i> Морские наводнения на побережье Олюторского залива (Западное побережье Берингова моря) в ледовый период	86
<i>Ю.В. Любичкий, Д.Р. Шпачук.</i> Особенности режима поверхностных течений в прибрежных районах тихоокеанского побережья полуострова Камчатка	94
<i>А.Н. Манько.</i> Основные результаты сравнительного анализа измерений уровня моря в прибрежной зоне различными измерительными средствами	106
<i>А.Н. Манько, М.Г. Диденко, В.Н. Храмушин.</i> Оценки цунамиопасности побережья залива Петра Великого на основе численного моделирования	114
<i>М.А. Данченков.</i> Рельеф дна в исследованиях океанографии Японского моря	126

ГИДРОЛОГИЯ

<i>Н.Ю. Сидоренко.</i> Методический подход к расчету допустимых погрешностей уровня для определения оправдываемости прогнозов дождевых паводков на реках Приморья	138
---	-----

ЭКОЛОГИЯ

<i>А.В. Мощенко.</i> О возможности применения в практике экологического мониторинга общих характеристик таксономических групп макрозообентоса	146
<i>Т.А. Белан, Б.М. Борисов, А.А. Круц, Е.А. Кадун, А.А. Калюкина.</i> Условия среды и состояние макрозообентоса на акватории морского порта Владивосток	178
Аннотации	194

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ ФГБУ «ДВНИГМИ»

Введение

Территория Дальнего Востока России в течение тёплого периода года нередко подвергаются разрушительному воздействию тайфунов – тропических циклонов (ТЦ) северо-западной части Тихого океана. Как правило, ТЦ сопровождаются обильными осадками и скоростями ветра до нескольких десятков метров в секунду. Прямое и/или косвенное влияние ТЦ вызывает значительный материальный ущерб и нередко сопровождается человеческими жертвами. Так, в результате сильных и продолжительных дождей, вызванных выходом супертайфуна HINNAMNOR на Приморский край в сентябре 2022 г, погибло восемь человек, был нанесен масштабный ущерб дорожной инфраструктуре в различных районах Приморья, социальным и образовательным объектам, жилым домам, имуществу местных жителей. В крае был введен режим чрезвычайной ситуации федерального характера [3].

Известно, что для моделирования и прогнозирования ТЦ и связанных с ними опасных явлений погоды необходимо использование современных моделей и технологий численного прогноза погоды (ЧПП), специально «заточенных» под описание ТЦ. У нас в стране исследования по численному прогнозированию тропических циклонов длительное время велись ещё в 70-х годах прошлого столетия. Так, к 1989 г. проблемами исследования ТЦ занимались коллективы пяти научно-исследовательских учреждений Государственного комитета СССР по гидрометеорологии [10]: ИЭМ НПО «Тайфун» (г. Обнинск), Гидрометцентра СССР (г. Москва), ЦАО (г. Долгопрудный), ДВНИГМИ (г. Владивосток), ВНИИГМИ-МЦД (г. Обнинск). Отдельные работы по теории зарождения тропических циклонов, взаимодействию атмосферы и океана в зонах действия циклонов, спутниковым методам исследования тропической зоны, физическому моделированию атмосферных вихрей велись в научно-исследовательских институтах Академии наук и на кафедрах высших учебных заведений СССР. Из упомянутых пяти учреждений именно на ДВНИГМИ приказом Госкомгидромета СССР № 251 от 17.09.1979 были возложены функции научно-исследовательского центра по оперативным прогнозам тайфунов на Дальнем Востоке. За разработку гидродинамических (численных) методов прогноза перемещения ТЦ в то время отвечал Гидрометцентр СССР. В ДВНИГМИ велись работы по разработке синоптических и статистических методов прогноза зарождения, эволюции и перемещения ТЦ, например, [7, 8, 11, 12, 13], а также испытания численных моделей прогноза ТЦ Гидрометцентра СССР [4].

В период с 1992 по 2010 гг. в связи с произошедшими в стране политическими и экономическими изменениями метеорологическая служба в нашей стране

претерпела определенную реорганизацию [2]. Фактически, к 2012 г. ДВНИГМИ остался единственным научно-исследовательским учреждением, занимающимся вопросами оперативного прогнозирования тропических циклонов в России. Появление гидродинамических (численных) моделей с открытым кодом [20], а также увеличение вычислительных ресурсов ДВНИГМИ к 2012 г. позволило прийти к созданию к 2017 г. автоматизированного метода краткосрочного (с заблаговременностью до 72 ч) прогноза тропических циклонов северо-западной части Тихого океана численной региональной моделью HWRF-Ru третьего поколения [5].

В данной статье приводится обзор текущего состояния системы ЧПП HWRF-Ru ДВНИГМИ, её технологических компонент, взаимосвязей между ними и примеры выпускаемой прогностической продукции. Обсуждаются перспективные направления дальнейшего развития системы.

Краткое описание системы ЧПП HWRF-Ru ДВНИГМИ

В настоящее время на вычислительных ресурсах ФГБУ «ДВНИГМИ» развернута региональная система краткосрочного численного прогнозирования ТЦ на основе модели тропических циклонов HWRF-Ru (III). Эта система развивается достаточно давно [5, 6], её прогностическая продукция распространяется потребителям – УГМС ДВ-региона, МЧС России. В частности, численные прогнозы ТЦ, выпускаемые системой ЧПП, использовались:

– во время саммита АТЭС (2012 г.) выполнялся расчёт прогнозов положения и интенсивности ТЦ северо-западной части Тихого океана с учетом выхода на юг Дальнего Востока России и ДВ-моря;

– для анализа воздействия ТЦ CHAN-НОМ на побережье КНР в районе порта Шанхай в период с 10.07.2015 по 20.07.2015 при подготовке аналитической записки для генеральной прокуратуры Российской Федерации по запросу ООО «НКЗ» от 2.09.216 г. № 651;

– для прогноза положения и интенсивности ТЦ HINNAMNOR и вызванных им атмосферных осадков, во время выхода ТЦ на Приморский край в сентябре 2022 г.

В состав системы ЧПП HWRF-Ru ДВНИГМИ входят следующие оперативные компоненты:

– технология запроса текстовых телеграмм TCVITALS Объединенного центра предупреждения о тайфунах США (Joint Typhoon Warning Centre, JTWC), обновляющихся на серверах Глобальной системы прогнозов Национального центра экологического прогноза США;

– региональная технология выпуска краткосрочных прогнозов ТЦ на базе модели HWRF-Ru [5, 6, 16], с горизонтальным шагом 27/9 км, предназначенная для выпуска прогнозов положения и интенсивности ТЦ и выпуска специализированной продукции (ТЦ-метеограммы) для обеспечения потребителей по территории Дальнего Востока России.

Это основная технология численных прогнозов ТЦ в Дальневосточном регионе России, она рассчитывается ежедневно один раз в сутки, а при угрозе выхода ТЦ –

два раза в сутки. Это наиболее важная из функционирующих на базе вычислительных средств ФГБУ «ДВНИГМИ» (г. Владивосток) компонента системы ЧПП HWRF-Ru основана на расчёте версии модели HWRF-Ru версии 3.3.1;

- технология передачи текстовых телеграмм, содержащих прогностические положение и интенсивность ТЦ, в систему АСПД Росгидромета;
- технология передачи карт-слайдов прогноза ТЦ, ТЦ-метеограммы в систему АСПД Росгидромета и на сайт ДВНИГМИ.

Вычислительный цикл системы ЧПП HWRF-Ru ДВНИГМИ

По аналогии с системой ЧПП РСМЦ Хабаровск [1], система ЧПП HWRF-Ru (III) представляет собой совокупность взаимосвязанных компонент, исполняющихся в оперативном режиме по расписанию.

Система ЧПП HWRF-Ru (III) позволяет выполнять следующие действия:

- подготавливать исходные данные, необходимые для модели прогноза ТЦ;
- запускать по расписанию и обеспечивать взаимодействие компонент системы ЧПП ТЦ на вычислительных ресурсах ДВНИГМИ;
- проводить контроль выполнения расчёта численных прогнозов ТЦ;
- обрабатывать типичные ситуации: отсутствие ТЦ, отсутствие данных, сбои в работе исполняемых файлов тайфунной модели и др;
- осуществлять построение текстовой, графической и цифровой прогностической продукции о ТЦ северо-западной части Тихого океана.

Система HWRF-Ru (III) состоит из набора скриптов и исполняемых файлов. Наиболее «тяжелые» в смысле вычислительных ресурсов задачи (geogrid.exe, metgrid.exe, real_nmm.exe, wrf.exe, unipost.exe) реализованы для работы в параллельном режиме.

Для старта составляющих оперативных компонент системы используется основной управляющий скрипт, запускающийся по cron-расписанию. Данный скрипт включает последовательную реализацию следующих этапов: подготовка начальных и граничных данных (препроцессинг модели); инициализация начальных и граничных условий в окрестностях ТЦ в соответствии с телеграммой TCVITALS на время начала расчетного периода; расчёт по численной модели; обработка сгенерированных численной моделью прогностических данных для выпуска и распространения готовой продукции.

На первом этапе работы системы HWRF-Ru (III) в соответствующем скрипте производится подготовка начальных и граничных данных WRF Pre-Processing System (WPS). Перед запуском WPS производится предварительное формирование файлов конфигурации системы ЧПП, где на основе начальных координат ТЦ, получаемых из текстовых телеграмм TCVITALS, определяется положение области расчётов, задаются шаги по пространству и времени, сроки расчёта, наборы физических параметризаций и других параметров расчёта. В работу WPS входят: подготовка данных о подстилающей поверхности и рельефе; декодирование начальной и граничной информации от глобальной системы прогнозов Национального центра экологического прогноза США; подготовка полей под горизонтальное пространственное разрешение области расчета. Далее производится вертикальная

интерполяция полей для окончательной подготовки исходных данных в области расчета модели.

Следующим этапом работы системы ЧПП является инициализация начальных и граничных условий в окрестностях ТЦ [5, 16], что, собственно, и отличает тайфунную версию модели WRF от обычной версии модели WRF общего пользования. Известно, что ТЦ в своем большинстве развиваются над океанами, незначительно охваченными метеорологическими данными. В силу этого ТЦ получается недостаточно глубоким и размытым. В схеме инициализации для модели HWRF предусматривается разделение начального поля анализа на фоновый поток и, собственно, саму ТЦ-циркуляцию.

В свою очередь, ТЦ-циркуляция в дальнейшем строится из двух составляющих: симметричной и несимметричной. Далее идет выделение области с ТЦ-циркуляцией, перенос центра ТЦ в точку с истинными координатами, удаление исходной и внедрение «искусственной» ТЦ-циркуляции. При этом «искусственный» ТЦ может быть не вполне согласован с окружающим его потоком, и обычно требуется некоторое время для восстановления нормальной структуры ТЦ.

Этап расчёта по модели WRF-Ru (III) выполняется стандартным образом, но на основе начальных и граничных данных, модифицированных с учётом ТЦ, на предыдущем шаге. По окончании расчётов по модели WRF-Ru (III) выполняется скрипт, реализующий этап постпроцессинга. На этом этапе сгенерированные численной моделью прогностические данные в формате netCDF преобразуются в GRIB.

На заключительном этапе работы системы ЧПП производится трекинг вихрей всех ТЦ [19], находящихся в области расчётов; подготовка прогностических текстовых телеграмм о ТЦ; построение карт-слайдов положения и интенсивности ТЦ, построение ТЦ-метеограмм, выставление на сайт ДВНИГМИ. Заканчивается работа системы ЧПП передачей готовой продукции потребителям.

Численная продукция системы ЧПП HWRF-Ru ДВНИГМИ

Рассматриваемая система HWRF-Ru (III) обеспечивает прогностические учреждения Росгидромета Дальневосточного региона оперативными краткосрочными прогнозами положения и интенсивности ТЦ северо-западной части Тихого океана. Система HWRF-Ru (III) генерирует продукцию в цифровом, текстовом и графическом форматах с временной детализацией 3 ч на период до 72 ч (трое суток).

Цифровая продукция – поля метеорологических элементов в формате GRIB на стандартных изобарических поверхностях и уровне земли по ограниченному району – представляются в широтно-долготной сетке с шагом $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ и могут быть предоставлены по запросу потребителей. Прогностическая продукция о ТЦ в текстовом формате ATCF (Automated Tropical Cyclone Format) отражает временной ход основных характеристик ТЦ у поверхности Земли (географические координаты ТЦ, приземное давление в центре ТЦ, максимальный ветер, радиусы зон ветров 34, 54 и 60 узлов по четырем секторам ТЦ и т. д.). На рис. 1 представлен фрагмент текстового файла в ATCF-формате на примере прогноза ТЦ HINNAMNOR от 12 ВСВ 4 сентября 2022 г.

WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00000, 279N, 1245E, 90, 941, XX, 34, NEQ, 0090, 0092, 0035, 0031, 0, 0, 21
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00000, 279N, 1245E, 90, 941, XX, 50, NEQ, 0047, 0053, 0019, 0013, 0, 0, 21
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00000, 279N, 1245E, 90, 941, XX, 64, NEQ, 0036, 0038, 0010, 0000, 0, 0, 21
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00300, 284N, 1244E, 71, 965, XX, 34, NEQ, 0106, 0109, 0066, 0037, 0, 0, 27
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00300, 284N, 1244E, 71, 965, XX, 50, NEQ, 0048, 0053, 0030, 0014, 0, 0, 27
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00300, 284N, 1244E, 71, 965, XX, 64, NEQ, 0037, 0040, 0000, 0000, 0, 0, 27
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00600, 288N, 1243E, 67, 968, XX, 34, NEQ, 0115, 0130, 0069, 0040, 0, 0, 36
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00600, 288N, 1243E, 67, 968, XX, 50, NEQ, 0053, 0056, 0033, 0021, 0, 0, 36
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00600, 288N, 1243E, 67, 968, XX, 64, NEQ, 0038, 0039, 0000, 0000, 0, 0, 36
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00900, 293N, 1243E, 65, 969, XX, 34, NEQ, 0119, 0116, 0073, 0037, 0, 0, 29
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00900, 293N, 1243E, 65, 969, XX, 50, NEQ, 0053, 0057, 0025, 0000, 0, 0, 29
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 00900, 293N, 1243E, 65, 969, XX, 64, NEQ, 0038, 0038, 0000, 0000, 0, 0, 29
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 01200, 298N, 1243E, 61, 969, XX, 34, NEQ, 0117, 0118, 0082, 0045, 0, 0, 33
WP, 12, 2022090412, 03, HWRf, 01200, 298N, 1243E, 61, 969, XX, 50, NEQ, 0045, 0045, 0034, 0021, 0, 0, 33

Рис. 1. Пример фрагмента текстового файл-прогноза ТЦ HINNAMNOR (1222)

Графическая продукция включает карты-слайды положения и интенсивности ТЦ (рис. 2) и ТЦ-метеограммы (рис. 3).

В левой половине карты-слайда располагается карта с нанесением: прогностической траектории ТЦ – ломаная линия черного цвета; областей сильных ветров более 34, 50, 64 узлов – окружности зелёного, красного и фиолетового цветов соответственно; области сильных ветров более 34 узлов с учётом погрешности прогноза положения ТЦ – выделены оранжевым цветом. В правой половине карты-слайда содержится табличная цифровая информация: наименование ТЦ; название и версия численной модели; период действия прогноза согласно ВСВ;

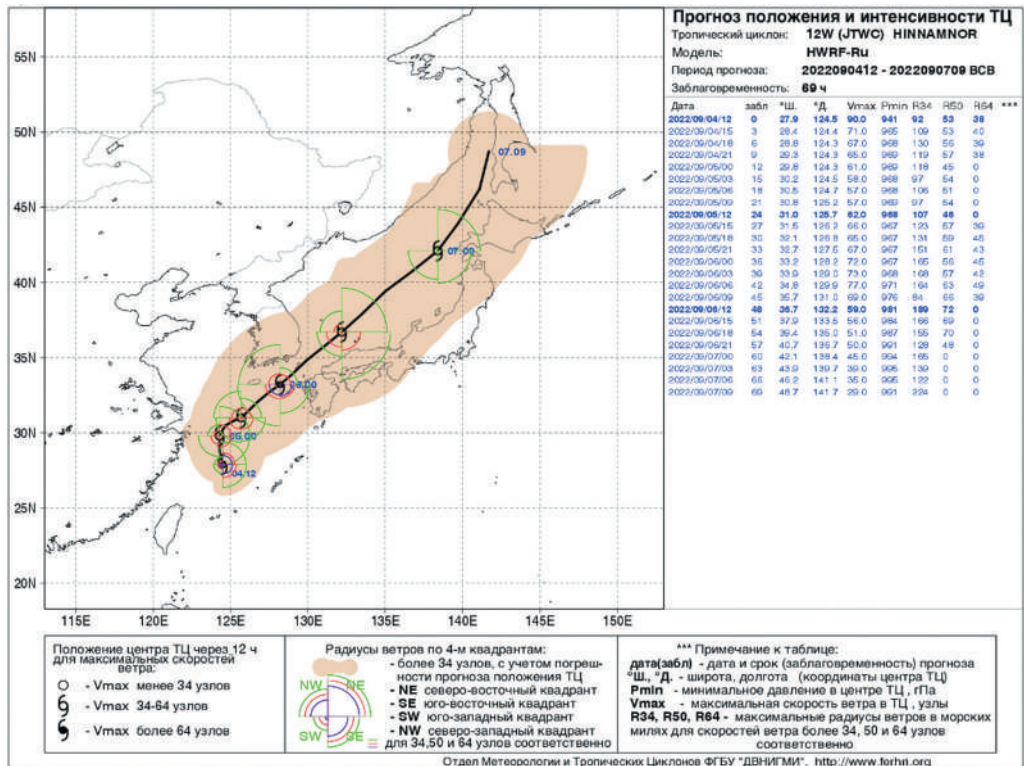


Рис. 2. Пример прогностической карты-слайда для ТЦ HINNAMNOR

в тайфуне: минимальном давлении в тайфуне (гПа) и расчётной максимальной скорости ветра. Согласованный временной ход этих параметров говорит сам за себя, и здесь подробно не рассматривается. Для удобства анализа шкала для значений максимальной скорости указана в двух единицах – в м/с и в узлах.

Секция 2. «Прогностическая информация по средней тропосфере тайфуна». В этой секции содержатся прогностические данные о ключевом параметре средней тропосферы в тайфуне – конвективной деятельности. Мощность конвективной деятельности на ТЦ-метеограмме представляется интенсивностью осадков (мм/3 ч) в окрестности ТЦ в пределах квадрата $6^\circ \times 6^\circ$. Средняя сумма осадков за период при этом характеризует среднюю интенсивность восходящих токов в ближайшей окрестности тайфуна. В то же время интенсивность восходящих вертикальных токов в горячих башнях аппроксимируется максимальным (пиковым) значением интенсивности осадков (мм/3 ч) в его окрестности в пределах квадрата $6^\circ \times 6^\circ$ вокруг ТЦ. На заключительном этапе существования ТЦ максимальное значение интенсивности осадков быстро уменьшается, приближаясь к средним значениям.

Секция 3. «Тёплое ядро ТЦ». В этой секции содержится прогностическая информация о так называемом «тёплом ядре» тайфуна. В ТЦ-метеограмме процессы «тёплого ядра» представлены характеристиками температуры воздуха в окрестности ТЦ на уровне 200 гПа. В них входят температура воздуха на 200 гПа в точке с координатами центра тайфуна и аномалия температуры воздуха на 200 гПа в окрестности ТЦ. При усилении тайфуна величины самой температуры и её аномалии возрастают. Уменьшение аномалии температуры до нулевых или отрицательных значений, как правило, говорит об окончании жизненного цикла тайфуна, и наступлении последней его стадии – стадии трансформации во внетропический вихрь.

Секция 4. «Ветер в окрестности тайфуна». В этой секции содержится прогностическая информация о скорости и направлении ветра в радиусе 3° от центра ТЦ, а также радиусы максимальных ветров свыше 34 узлов по квадрантам.

Секция 5. «Приложение». Сюда входит дополнительная вспомогательная информация, такая, как: направление перемещения, интенсивность тайфуна и расстояние до Владивостока в км.

В завершение описания ТЦ-метеограммы необходимо упомянуть, что если жизненный цикл ТЦ заканчивается ранее трёх суток, далее график не обрисовывается, а заполняется жёлтым фоном

Оперативная продукция системы ЧПП HWRF-Ru публикуется на веб-сайте ДВНИГМИ www.ferhri.ru.

Успешность продукции системы ЧПП HWRF-Ru ДВНИГМИ

В настоящем разделе обсуждается степень успешности продукции системы ЧПП HWRF-Ru (III) в сравнении с аналогичными характеристиками зарубежных метеорологических агентств (JMA, JTWC), специализирующихся в области прогноза ТЦ. Под успешностью продукции здесь понимается качество прогнозов положения и интенсивности ТЦ, в рамках категорий успешности, согласно [9]. Другие оценки оправдаваемости прогнозов ТЦ, например, ошибки определения

минимального давления в центре ТЦ, скорости и направления перемещения ТЦ, а также другие характеристики в данной работе не рассматриваются, так как зарубежными агентствами они не рассчитываются.

На рис. 4 представлены оценки оправдываемости прогнозов тайфунов северо-западной части Тихого океана, основанные на материалах следующих источников: системы ЧПП HWRF-Ru (III) ДВНИГМИ, Объединённого центра предупреждения о тайфунах США (Joint Typhoon Warning Centre, JTWC) [18], Японского метеорологического агентства (Japan Meteorology Agency, JMA) и Японской глобальной спектральной модели (JMA-GSM) [17].

Необходимо отметить, что, успешность прогнозов положения ТЦ (рис. 4 а, в, д) от всех четырёх источников прогностической продукции о положении ТЦ необходимо признать хорошей (согласно [9]), так как величины ошибок меньше допустимых лимитов для заблаговременностей 24, 48 и 72 ч, составляющих 200, 350 и 500 км соответственно.

Для всех рассматриваемых заблаговременностей средняя абсолютная ошибка положения центров ТЦ от всех четырех источников прогностической продукции о положении ТЦ испытывает значительные межгодовые изменения. При этом оценки успешности по положению центров ТЦ от Объединённого центра предупреждения о тайфунах США (Joint Typhoon Warning Centre, JTWC), Японского метеорологического агентства испытывают небольшие отрицательные тренды по времени (некоторое улучшение качества прогноза положения ТЦ). Оценки успешности по положению центров ТЦ от системы ЧПП HWRF-Ru (III) ДВНИГМИ и Японской глобальной спектральной модели (JMA-GSM) практически не меняются за период анализа 2014–2023 гг.

Анализ величин средней абсолютной ошибки прогнозов интенсивности ТЦ от вышеперечисленных прогностических систем (рис. 4 – б, г, е) показывает, что наилучшие показатели успешности (3–8 м/с для всех заблаговременностей) демонстрируют Объединённый центр предупреждения о тайфунах США (Joint Typhoon Warning Centre, JTWC) и Японское метеорологическое агентство (Japan Meteorology Agency, JMA). Несколько хуже обстоит дело с успешностью прогнозов интенсивности ТЦ по модели JMA-GSM, там величины ошибок составляют примерно 7 м/с, 9 м/с, 10 м/с для 24, 48 и 72 ч соответственно.

Успешность прогнозов интенсивности ТЦ по модели HWRF-Ru (III) сравнима (~7 м/с) с таковыми по модели JMA-GSM на заблаговременности до 24 ч. В дальнейшем, с увеличением заблаговременности до 48 и 72 часов успешность прогнозов интенсивности ТЦ по модели HWRF-Ru (III) значительно уступает успешности остальных прогностических систем, составляя примерно 7–19 м/с и 10–20 м/с, для 48 и 72 ч, соответственно. Заметим, при проведении оперативных испытаний 2014–2016 гг. именно это обстоятельство определило консультативный статус прогнозов интенсивности ТЦ по модели HWRF-Ru (III). Возможной причиной этого может служить относительно большое (по современным меркам) пространственное разрешение основной расчетной сетки модели HWRF-Ru (III), составляющее 27 км. Для сравнения, пространственное разрешение расчётной сетки модели JMA-GSM

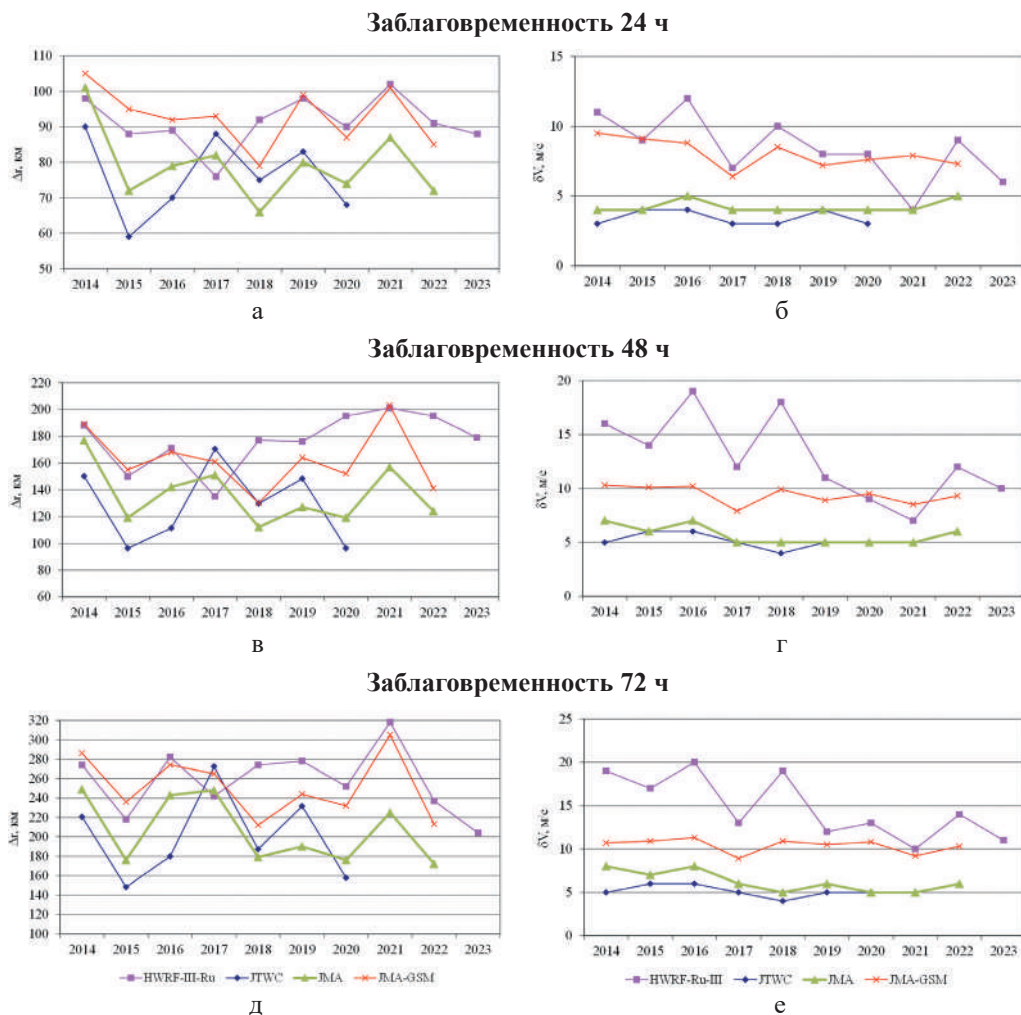


Рис. 4. Средняя абсолютная ошибка положения (а, в, д) и интенсивности (б, г, е) ТЦ по годам для различных заблаговременностей прогноза

составляет 20 км. Также вызывает интерес небольшой отрицательный временной тренд ошибок прогноза интенсивности ТЦ с 2014 по 2023 гг. для обеих модельных прогностических систем. Учитывая, что изменения в модель HWRF-Ru (III) разработчиками ДВНИГМИ не вносились, возможной причиной этого уменьшения может служить улучшение качества начальных данных, получаемых от глобальной системы прогнозов Национального центра экологического прогноза США.

В целом, успешность прогнозов системы HWRF-Ru (III) ДВНИГМИ по положению и интенсивности ТЦ находится на уровне остальных источников прогностической продукции о положении ТЦ. При этом успешность прогнозов ТЦ от системы ЧПП HWRF-Ru (III) ДВНИГМИ близка к успешности модельных прогнозов Японской глобальной спектральной модели (JMA-GSM).

Также заметим, что возможным объяснением наилучших показателей успешности прогнозов ТЦ от прогностических систем JTWC и JMA может быть применение дополнительных уточняющих физико-статистических методов, что, очевидно, является их своеобразным секретом производства (know how).

Планируемые в ближайшей перспективе усовершенствования системы ЧПП тайфунов северо-западной части Тихого океана

В модели HWRF-III-Ru, в связи с относительно большим пространственным шагом материнской сетки (27 км), прогноз элементов погоды по станциям несколько затруднен, так как модель предназначена для прогноза положения и интенсивности ТЦ.

В настоящее время выполняется разработка экспериментальной технологии расчёта по модели HWRF версии 4 с горизонтальным шагом 15/5/2 км и не менее чем 43 уровнями по вертикали [15].

В модели HWRF-IV существенно доработано использование схем параметризации физических процессов подсеточного масштаба. В 2018 г. в модель HWRF-IV включена объединённая 4-слойная схема Noah с температурой и влажностью почвы, фрагментным снежным покрытием и физикой замороженной почвы. Это обстоятельство позволило, кроме, собственно, генерации прогнозов ТЦ, перейти к возможности расчётов прогнозов элементов погоды по станциям. Для описания микрофизических процессов в модели HWRF-IV применяется модифицированная шестиклассовая схема Ферьера с учётом льда, снега и града, а также перехода облачной воды в дождь, испарения дождя, таяния льда, аккреции облачной воды льдом, замерзания дождя, конденсации воды на тающем льде, испарения влажного тающего снега. Процессы смешанной фазы в этой версии могут протекать при температурах выше $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в обычной схеме Ферьера). Модифицированы три параметра тропической атмосферы: увеличены максимально возможная концентрация льда, максимально возможная концентрация капель и скорость падения снежинок в условиях положительных температур. Схема Ферьера разделяет влагу облаков (облачная влага, облачный лёд) и осадков (дождь, снег, мокрый снег, граупели, град). Для представления переноса тепла длинноволновой и коротковолновой радиацией в атмосфере применяется модифицированная схема RRTMG. В сравнении с внетропическими циклонами, в тайфунах имеет место меньшая зависимость непосредственно от радиационных потоков. Для описания процессов в планетарном пограничном слое (ППС) используется нелокальная K-схема «GFS» [15]. Расчёт ветра на стандартных уровнях в ППС в модели HWRF-IV производится так же, как и в обычной модели WRF – на основе полуэмпирического подхода, опирающегося на теорию подобия Монина-Обухова, доработанного Блэкадаром [15]. За параметризацию мелкой и глубокой конвекции в текущей численной реализации отвечает проверенная схема Аракавы–Шуберта с модификацией Грела, Хана и Пана [15].

В связи с существенным увеличением числа узлов сетки при переходе от шага в 27/9 км к 15/5/2 км необходимо уточнить настройки модели HWRF-IV [15] и переконфигурировать область расчёта. В этом случае число точек на сетке «E»

Аракавы составит 288×576 , а необходимый при этом шаг по времени для динамического ядра WRF составит 30 секунд вместо 54. Для расчёта модели HWRF-IV-Ru в такой конфигурации необходимо задействовать высокопроизводительный вычислительный комплекс (ВБК) на базе кластера CRAY XC-40 регионального вычислительного центра ФГБУ «Дальневосточное УГМС».

В отличие от модели HWRF-Ru (III) с одной вложенной сеткой, в модели HWRF-IV-Ru область расчётов содержит две вложенные сетки, как показано в таблице 1 и на рис. 5.

Таблица 1. Сеточная конфигурация моделей HWRF-III-Ru и HWRF-IV-Ru

Модель	Расчетная область		
	Домен D01	Домен D02	Домен D03
HWRF-III-Ru	27 км 216×432 $77^\circ \times 77^\circ$	9 км 88×170 $11^\circ \times 11^\circ$	отсутствует
HWRF-IV-Ru	15 км 288×576 $77^\circ \times 77^\circ$	5 км 265×532 $24^\circ \times 24^\circ$	2 км 235×472 $7^\circ \times 7^\circ$

В используемой версии модели HWRF-IV, так же, как и в предыдущей версии (HWRF-III), применяется инициализация вихря тропического циклона по методу Лаборатории геофизической гидродинамики Национального центра США прогноза окружающей среды.

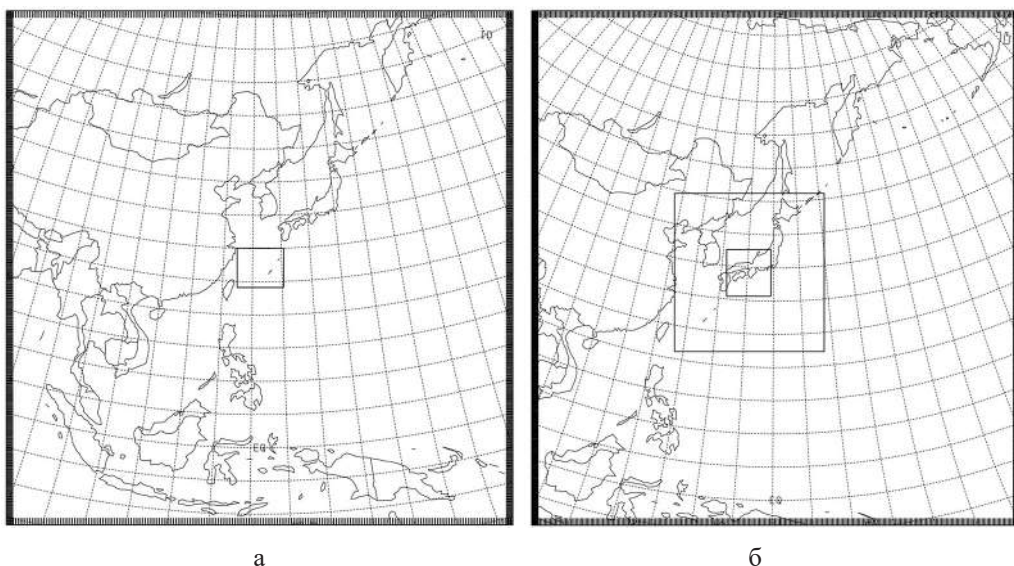


Рис. 5. Пример области расчётов модели: а) HWRF-III-Ru, б) модели HWRF-IV-Ru

Блок модельного расчёта HWRF-IV – wrf.exe собран на основе технологии параллельного ввода-вывода NetCDF4/PNetCDF с поддержкой возможности работы в режиме «квилтинг» (quilting) [14].

На дальнейшем этапе работы системы HWRF-Ru (III) ДВНИГМИ программой UNIPOST дополнительно осуществляется расчёт и интерполяция основных метеорологических переменных – геопотенциал, температура, влажность, ветер с η -уровней орографической системы координат уровней WRF на стандартные уровни и приведение выходных данных WRF к формату GRIB. Эти данные необходимы для работы программы трекинга ТЦ [19].

Другие усовершенствования системы ЧПП связаны с реализацией новых прогностических технологий, например, прогноза параметров ТЦ для нужд авиации – высоты эшелона верхней границы кучево-дождевых облаков.

В дополнение к указанным компонентам планируется разработка новых и усовершенствование существующих методов и технологий выпуска специализированных краткосрочных прогнозов, в том числе опасных явлений погоды, связанных с прямым и косвенным влиянием ТЦ.

Заключение

В статье рассмотрено текущее состояние системы ЧПП HWRF-Ru (III) ФГБУ «ДВНИГМИ»: представлена информация о технологических особенностях работы компонент системы прогноза ТЦ и их информационном взаимодействии, показаны образцы выходной продукции, выпускаемой в цифровом, текстовом и графическом форматах. Система ЧПП имеет модульную структуру и содержит встроенные процедуры управления, что позволяет не только эксплуатировать систему в оперативном режиме, но и при необходимости добавлять и тестировать новые и усовершенствованные компоненты системы.

В ближайшей перспективе ожидается реализация новых компонент системы ЧПП РСМЦ Хабаровск на вычислительных ресурсах РВЦ ФГБУ «Дальневосточное УГМС»:

- технологической линии выпуска краткосрочных прогнозов ТЦ северо-западной части Тихого океана и связанных с ними опасных явлений погоды на основе региональной негидростатической модели HWRF-IV-Ru с горизонтальным шагом по пространству 15/5/2 км и не менее 43 уровней по вертикали;
- ряда других компонент.

В заключение следует отметить, что создание отечественной системы численного прогноза тропических циклонов является, безусловно, важной стратегической задачей развития систем ЧПП в РФ.

Работа выполнена при финансовой поддержке научно-исследовательских, технологических работ НИУ Росгидромета в рамках государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации».

Литература

1. Вербицкая Е.М. Система численного прогноза погоды регионального специализированного метеорологического центра в Хабаровске и перспективы ее развития и совершенствования // Тр. ДВНИГМИ. – 2021. – Вып. 156. – С. 57–72.

2. Время перемен (Росгидромет в 1991–2010 годы) / Под ред. А.И. Бедрицкого. – М.: РГМО. – 2022. – 336 с.
3. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. Тропические циклоны. Сентябрь 2022 г. – URL:
http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2022/9/2022.09_ch5_typhoon.pdf
4. Зленко В.А. Гидродинамическая схема расчета траекторий тропических циклонов // *Метеорология и гидрология*. 1987. № 5. – С. 56–61.
5. Крохин В.В., Филь А.Ю., Евдокимова Л.И. Технология выпуска прогнозов тайфунов северо-западной части Тихого океана по модели HWRF–ДВНИГМИ // *Тр. ДВНИГМИ*. – 2017. – Вып. 155. – С. 8–31.
6. Крохин В.В., Филь А.Ю., Евдокимова Л.И., Моисеев М.Б., Котович Н.Г. Технология краткосрочных прогнозов тропических циклонов северо-западной части Тихого океана на основе региональной модели HWRF-Ru // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2018. – № 4 (370). – С. 74–87.
7. Кузин В.С. Синоптический метод прогноза тропических циклонов // *Труды ДВНИГМИ*. – 1987. – Вып. 138. – С. 71–85.
8. Павлов Н.И. Статистические методы прогноза перемещения и эволюции тайфунов на 1–3 суток // *Труды ДВНИГМИ*. – 1975. – Вып. 38. – С. 117–131.
9. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов: методические указания. РД 52.27.284-91. М.: Комитет гидрометеорологии при Кабинете министров СССР. – 1991. – 150 с.
10. Тропические циклоны. Результаты исследований советских ученых / Под ред. В.М. Волощука и А.Ф. Нерушева. – Л.: Гидрометеониздат. – 1989. – 54 с.
11. Туноголовец В.П. Новый статистический регрессионный способ прогноза перемещения тропических циклонов, давления в центре, максимального ветра и зон с сильными, ураганскими и максимальными ветрами // *Труды ДВНИГМИ*. – 1997. – Вып. 149. – С. 51–75.
12. Туноголовец В.П., Нападий В.Е. Метод прогноза перемещения и интенсивности тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана с заблаговременностью до 72 ч / *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов погоды*. – Нижний Новгород: Вектор–Тис, 2007. – № 34. – С. 70–92.
13. Туноголовец В.П. Комплексный метод прогноза перемещения и интенсивности тайфунов // *Юбилейный вып. ДВНИГМИ – 60 лет*. Владивосток: Дальнаука. – 2010. – С. 189–202.
14. Balle T., Johnsen P. Improving I/O Performance of the Weather Research and Forecast (WRF) Model. 2016. Cray User Group. N. 123. – 7 p.
15. Biswas M.K. Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) Model: 2018 Scientific Documentation. – 2018. – Scientific Documentation (No. NCAR/TN-544). doi:10.5065/D6MK6BPR. – URL: https://dtcenter.org/sites/default/files/community-code/hwrf/docs/scientific_documents/HWRFv4.0a_ScientificDoc.pdf.
16. Gopalakrishnan S. Hurricane Weather and Research and Forecasting (HWRF) Model 2011 Scientific Documentation, Technical Report // Boulder. Developmental Tested Center. – URL: http://www.dtcenter.org/HurrWRF/users/docs/scientific_documents/HWRFScientificDocumentation_August2011.pdf.

17. JMA Annual Tropical Cyclone Report 1959–2022 – URL: <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/AnnualReport>
18. Joint Typhoon Warning Center Annual Tropical Cyclone Report 1959–2020 – URL: <https://www.metoc.navy.mil/jtwc/products/atcr>
19. Marchok T How the NCEP tropical cyclone tracker works // 25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology: SAIC at NCEP/GFDL – Princeton, NJ. – 2002. – 2 p.
20. Power J.G., Klemp J.B., Skamrock W.C. The weather research and forecasting model: overview, system errors, and future directions // Bull. Amer. Meteorol. Soc., – 2017. – Vol. 98. – Pp. 1717–1737.

ПРОГНОЗ ОПАСНЫХ ДЛЯ АВИАЦИИ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

Введение

В статье излагаются результаты работ по созданию методов и технологий выпуска краткосрочных прогнозов опасных для авиации явлений погоды для территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Это метеорологические условия обледенения воздушных судов (ВС) с выделением зон умеренной и высокой интенсивности, наличие и интенсивность турбулентности в ясном небе (ТЯН), возникновение и интенсивность горных волн (ГВ), наличие и интенсивность пыльных и песчаных бурь (ППБ).

Работы выполнены в период 2020–2024 гг. по Плану НИТР Росгидромета (тема 1.4.2.2). Необходимость проведения таких работ обусловлена практически полным отсутствием отечественных и зарубежных технологий прогнозирования перечисленных опасных для авиации явлений погоды на рассматриваемой территории РФ. При этом требования ИКАО (ВМО) к региональным консультативным центрам по опасным явлениям погоды предполагают наличие современных автоматизированных технологий производства прогнозов всех основных опасных для авиации явлений погоды, перечисленных в соответствующих регламентах [8]. Такие технологии основаны на продукции численных моделей прогноза погоды (ЧПП) и усвоении данных наблюдений от всех доступных наблюдательных платформ.

Прогноз зон возможного обледенения воздушных судов

Исследованиям метеорологических условий, при которых велика вероятность обледенения воздушных судов, посвящено немало работ, достаточно полный обзор и анализ которых приведен в [9]. Существуют традиционные методы расчета базового индекса обледенения ВС по данным численных моделей (ЧПП) и работы по анализу степени успешности этих прогнозов [27]. В настоящее время в практике ведущих метеорологических центров для оценки угрозы обледенения ВС преимущественно используется методология, основанная на подходе Шульца и Политович [23], суть которой заключается в следующем: если модельная температура находится в заданном интервале и относительная влажность превышает заданное пороговое значение (R_0), то индекс обледенения устанавливается равным значению относительной влажности (R); при $R < R_0$ прогнозируется отсутствие обледенения.

В различных метеорологических центрах используются различные интервалы температур: нижняя граница от -20 °С до -15 °С, верхняя граница от 0 °С до $+1$ °С. Пороговые значения R_0 также различны и составляют от 0,50 до 0,65.

Результаты обширных исследований, приведенных, например, в [27], показали, что угроза существенного обледенения ВС наступает в интервале температур от -18 °С до 0 °С. Однако, по данным самолетного зондирования над европейской

территорией СССР за 1959–1963 гг. [11], случаи обледенения наблюдаются и при более низких температурах.

В таблице 1 представлено обобщение данных, из [14, табл. 2.22], которого видно, что в интервал температуры воздуха (t) от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $R > 0,6$ попадает 90,3 % всех наблюдаемых случаев обледенения, т. е. 9,7 % случаев пропускаются изначально в результате принятых ограничений.

Таблица 1. Повторяемость и распределение случаев обледенения по градациям температуры ($t\text{ }^{\circ}\text{C}$) и относительной влажности (R) (всего 32 428 самолетных сообщений)

$t\text{ }^{\circ}\text{C}$ R(%)	Повторяемость (%)					Распределение (%)				
	<-20	-20, -0	0, +4	>+4	Всего	<-20	-20, -0	0, +4	>+4	Всего
0–30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30–60	0,9	0,6	0	0	1,5	1,0	1,1	0	0	2,1
60–80	1,8	2,6	0,7	0	5,1	1,0	4,4	0,1	0	5,5
80–90	8,8	11,4	0,6	0	20,8	2,3	16,0	0,1	0,1	18,5
90–100	17,0	32,5	2,6	0,3	52,4	2,6	69,9	1,0	0,4	73,9
Всего	27,5	47,1	3,9	0,3	78,8	6,9	91,4	1,2	0,3	100,0

Кроме того, обледенение может наступить и при положительных температурах воздуха при перемещении ВС из области отрицательных температур в область положительных температур. Поверхность ВС, приобретающая в полете температуру, близкую к температуре окружающего воздуха, не успевает прогреться при быстром снижении ВС и входе в теплые и влажные слои атмосферы, что вызывает сублимацию водяного пара, содержащегося в обтекающих ВС потоках воздуха.

При использовании результатов ЧПП для прогноза характеристик состояния атмосферы следует учитывать погрешность модельных данных. Например, при дефиците точки росы (td) в $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительная влажность составляет 83 % – 86 % для интервала температур от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ для уровней в слое от 1000 до 100 гПа. При ошибке модельных прогнозов температуры и точки росы в $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, прогностические значения R могут принимать значения от 0,61 до 1, т. е. показывать практически любую интенсивность и даже отсутствие угрозы обледенения в принятых ограничениях. При этом прогноз температурных характеристик, согласно [11], при такой ошибке считается оправдавшимся. Для иллюстрации сказанного в таблице 2 представлено соотношение распределения по градациям значений R , рассчитанных по данным радиозондирования, при прогнозировании этих значений по модельным данным.

Расчёты выполнены по 80 пунктам радиозондирования (р/з или «зонд»), расположенным в ДВ регионе (в том числе в Китае, Монголии, Японии, Южной и Северной Корее), т. е. по всем пунктам р/з, попадающим в область прогноза модели [5]. Данные табл. 2 показывают, что при реальных значениях $R \geq 0,63 R$

Таблица 2. Распределение $f(\%)$ относительной влажности (R) по градациям

N = 13194		Градации R				$f(\%)$ зонд**	
		0	1	2	3		
		$< 0,63$	$0,63 \leq R < 0,80$	$0,80 \leq R < 0,90$	$R \geq 0,90$		
$f(\%)$ прогноз*		81	6	5	8		
З О Н Д	0	$R < 0,63$	92	4	2	2	85
	1	$0,63 \leq R < 0,80$	25	27	23	25	6
	2	$0,80 \leq R < 0,90$	16	15	27	42	4
	3	$R \geq 0,90$	14	13	17	56	5

* прогноз на срок 00 ВСВ по данным за 12 ВСВ; модель WRF-ARW (5 км, 46 уровней) [7],

** зонд – расчет по данным радиозондирования за срок 00ВСВ, 80 пунктов ДВ региона.

модельные данные попадают не в «свой» интервал с достаточно большой частотой (44 % – 73 %). Очевидно, изменение границ интервалов не приведет к существенному изменению результатов распределения. Следовательно, использование значений относительной влажности в качестве индекса для определения метеорологических условий возможного обледенения ВС определенной интенсивности по модельным данным весьма проблематично. Кроме того, известно, что при одном и том же значении относительной влажности количество влаги, содержащееся в единице массы воздуха, различно при различных значениях температуры и атмосферного давления.

В этой связи авторами разработан специальный индекс идентификации интенсивности возможного обледенения ВС

$$I_{ice} = p \cdot \Delta q(t, p), \quad (1)$$

где $\Delta q(t, p) = q(t, p) - a \cdot Q(t, p)$; a – коэффициент порогового уровня влажности воздуха; t, p – значения температуры воздуха и атмосферного давления; q, Q – значения фактического влагосодержания и влажности насыщения воздуха в рассматриваемой точке пространства в заданный момент времени.

Теоретические основы метода и вывод формулы (1) подробно изложены в [9], обоснование необходимости разработки и результаты апробации представлены в [28]. Основополагающая идея метода заключается в том, что при любых условиях количество влаги, способной осесть на поверхности ВС в данной точке пространства в данный момент времени ограничивается содержанием влаги в атмосфере в окрестности рассматриваемой точки. В методе полагается, что количество влаги, которое может сконденсироваться и/или замерзнуть и осесть на поверхности ВС, не превышает разности фактического влагосодержания воздушной массы и количества влаги, соответствующего пороговому уровню относительной влажности, ниже которого обледенение не наступает (наблюдениями не зафиксировано). Конечно, не вся эта влага в реальности оседает на поверхности ВС в виде льда, снежинок или кристаллов. Это зависит от множества факторов: типа ВС, скорости полета, наличия микроскопических кристаллов в текущем объеме воздуха

и т. д. Тем не менее, потенциально возможное количество влаги, способное осесть на поверхность ВС в фиксированной точке пространства в текущий момент времени, ограничивается этим количеством.

В [9] показано, что величина $p \cdot \max \Delta q(t = 0^\circ\text{C}, p)$ 1435,8 и является инвариантом относительно p, t, q . Этот инвариант положен в основу метода прогноза зон и интенсивности возможного обледенения ВС по модельным данным. При $I_{\text{ice}} < 0$ прогнозируется отсутствие явления. Интервал значений от 0 до 1435,8 делится на три равные части, и контрольные точки, отделяющие области слабого, умеренного и сильного обледенения, полагаются равными соответственно: $q_1 = 478,8$ и $q_2 = 957,2$. Отметим, что индекс I_{ice} существенно более устойчив к ошибкам модельного прогноза, чем относительная влажность. В табл. 3 приведено распределение значений I_{ice} по градациям, соответствующим прогностическим и фактическим условиям обледенения ВС. Границы градаций «нет», «слабое», «умеренное», «сильное» установлены согласно приведенным выше контрольным значениям I_{ice} : ниже 0, $[0, q_1)$, $[q_1, q_2)$, не менее q_2 . Расчеты выполнены по той же выборке, что и для R (табл. 2).

В табл. 3 представлены выраженные максимумы частоты попадания модельных значений I_{ice} в градацию, определенную по данным радиозондирования, а также убывание частот попадания в другие градации по мере удаления градации от интервала, определенного по данным радиозондирования. Для сравнения в скобках диагональных клеток указаны аналогичные значения частот для R .

Таблица 3. Распределение $f(\%)$ значений индекса I_{ice} по градациям

N = 13194		Прогноз*				$f\%$ (зонд**)
		$I_{\text{ice}} < 0$ нет	$0 \leq I_{\text{ice}} < q_1$ слабое	$q_1 \leq I_{\text{ice}} < q_2$ умеренное	$I_{\text{ice}} \geq q_2$ сильное	
$f(\text{прогноз}^*)$		81	13	4	2	
З* О Н Д	$I_{\text{ice}} < 0$	92 (92)	6	1	1	85
	$0 \leq I_{\text{ice}} < q_1$	21	62 (27)	16	1	10
	$q_1 \leq I_{\text{ice}} < q_2$	13	26	50 (27)	11	4
	$I_{\text{ice}} \geq q_2$	12	6	19	63 (56)	1

* прогноз на срок 00 ВСВ по данным за 12 ВСВ; модель WRF-ARW (5 км, 46 уровней) [7],

** зонд – расчет по данным радиозондирования за срок 00ВСВ, 80 пунктов ДВ региона.

Алгоритм реализации метода прогноза интенсивности обледенения ВС строится следующим образом. В каждом узле (i, j, k) прогностической сетки по модельным значениям давления p [гПа], температуры t [$^\circ\text{C}$] и фактического влагосодержания q [грамм/кг] рассчитываются значения произведения $I_{\text{ice}} = p \cdot \Delta q(t, p)$ при температуре $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$, где t_{\min} и t_{\max} – минимальное и максимальное значения температуры воздуха, ниже и выше которых предполагается, что обледенение не наступает. Интенсивность обледенения в узле (i, j, k) определяется в соответствии с градациями значений I_{ice} , приведенными в таблице 3, и кодируется значениями: 0 – нет

обледенения, 1 – слабое обледенение, 2 – умеренное обледенение, 3 – сильное обледенение.

После определения кода интенсивности обледенения в каждом узле трехмерной модельной сетки для каждого узла горизонтальной сетки (i, j) выполняется проверка на попадание модельного уровня « k » в интервал, ограничивающий рассматриваемые эшелоны полета. Интенсивность обледенения в точке (i, j) для заданного эшелона полета определяется по максимальному значению кода интенсивности из всех модельных уровней « k », попавших в интервал, ограничивающий эшелон полета.

На начальном этапе опытной эксплуатации метода было положено $t_{\min} = -20^{\circ}\text{C}$, $t_{\max} = +2^{\circ}\text{C}$. Предполагалось, что в процессе опытной эксплуатации значения t_{\min} , t_{\max} , q_1 , q_2 могут быть изменены по результатам сравнения с данными наблюдений. Практика показала, что корректировка нужна только для t_{\min} , т. к. все неоправдавшиеся прогнозы отсутствия обледенения при фактическом (наблюдаемом) наличии обледенения умеренной или высокой интенсивности относятся к случаям, когда прогностическое и фактическое значения температуры были ниже заданного значения t_{\min} .

Степень успешности оперативных прогнозов по данным модели WRF-ARW [25] с горизонтальным разрешением 15 км и 31 уровнем по вертикали [5] оценивалась путем сравнения с данными наблюдений по обледенению, полученными из сообщений AIREP. За период с 1 февраля 2020 г. по 30 ноября 2023 г. с рассматриваемой территории всего получено 85524 бортовых сообщений, из них зафиксировано 145 сообщений с данными по обледенению, в которых 53 сообщения – об отсутствии обледенения, 83 сообщения – об умеренном обледенении и 9 – о сильном обледенении. Заметим, что информации о наличии слабого обледенения за рассматриваемый период наблюдений над территорией ДВ-региона не поступало.

Для оценки степени успешности прогнозов составлена таблица сопряженности [11] для 145 случаев бортовых сообщений об обледенении, поступивших за период с 1 февраля 2020 г. по 30 ноября 2023 г. (табл. 4). В связи с малым количеством данных наблюдений о сильном обледенении (всего 9 сообщений) и отсутствии данных наблюдений о слабом обледенении все данные разделены на два класса: нет явления или слабая интенсивность (б/я) и обледенение умеренное или сильное (я).

По данным табл. 4 рассчитаны стандартные оценки качества прогноза явлений, регламентированные в [11]: предупредительность классов наличия и отсутствия

Таблица 4. Таблица сопряженности для расчета оценок качества прогнозов

факт \ прогноз	я	б/я	Итого
я	$n_{11} = 65$	$n_{12} = 10$	$n_{10} = 75$
б/я	$n_{21} = 0$	$n_{22} = 50$	$n_{20} = 50$
Итого	$n_{01} = 65$	$n_{02} = 60$	$n_{00} = 125$

явления ($P_{я}$, $P_{б/я}$ соответственно), оправдываемость альтернативного прогноза (U), оправдываемость прогноза наличия и отсутствия явления ($U_{я}$, $U_{б/я}$), критерий Пирси-Обухова (T), критерий Хейдке–Багрова (H). Результаты расчетов приведены в табл. 5: в целом за период и детализация по годам, демонстрирующая динамику повышения качества прогнозов по мере коррекции значений t_{min} .

Таблица 5. Значения числовых характеристик степени успешности прогнозов

Характеристика	$t_{min}, ^\circ\text{C}$	N	U, %	$P_{я}, \%$	$P_{б/я}, \%$	$U_{я}, \%$	$U_{б/я}, \%$	T	H
2020–2021 гг.	-20	66	91	85	100	100	81	0,85	0,82
2022 г.	-22	31	90	86	100	100	75	0,85	0,79
2023 г.	-24	26	96	92	100	100	94	0,92	0,91
2020–2023 гг.	–	123	92	87	100	100	83	0,87	0,84

Примечание: N – общее количество пар «факт – прогноз».

Представленный метод используется в РСМЦ Хабаровск для прогноза зон наличия и интенсивности возможного обледенения ВС по эшелонам полетов над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока в экспериментальном статусе. Расчеты выполняются ежедневно 4 раза в сутки в оперативном режиме. Прогнозы выпускаются в форме карт (рис. 1) и файлов в формате GRIB2 по заданному ФГБУ «Авиаметтелком» перечню эшелонов полета ВС. На карты наносятся зоны слабого, умеренного и сильного обледенения ВС градуированной заливкой. В файлах передаются перечисленные выше условные обозначения прогнозируемой интенсивности обледенения, т. е. в каждом узле сетки записаны значения 0, 1, 2 или 3. Файлы в формате GRIB2 доступны на ftp-сервере ФГБУ «Дальневосточное УГМС».

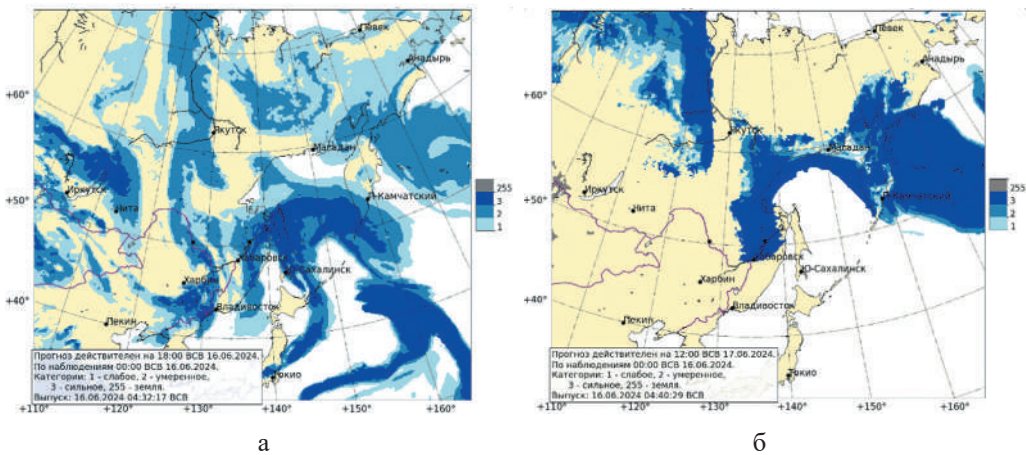


Рис. 1. Примеры карт прогноза зон возможного обледенения ВС в интенсивностях (прогноз на срок 18 ВСВ 16 июня 2024 г., рассчитанный от срока 00 ВСВ 16 июня 2024 г.): а) эшелон 100; б) эшелон 50

Технология прогнозирования турбулентности в ясном небе

Атмосферная турбулентность оказывает существенное влияние на условия полетов воздушных судов. Причинами турбулентности являются различные атмосферные процессы, перечень и анализ которых подробно изложен в литературе (например, в [6, 14, 16]). В контексте данной работы отметим только, что на безопасность полета оказывают влияние турбулентные вихри размерами, сопоставимыми с размерами ВС. Поэтому по данным ЧПП можно выполнить только диагностические расчеты по определению общих характеристик вихрей подсеточного масштаба даже при использовании моделей высокого пространственного разрешения [15, 18, 24].

Технология прогнозирования турбулентности в нижних уровнях разработана авторами данной статьи в рамках НИР 1.1.9.2 и применяется в практике метеорологического обслуживания аэронавигации на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока РФ с 2017 г. [4]. Поэтому здесь рассматривается турбулентность в средней и верхней тропосфере в отсутствие значительной облачности, т. е. в ясном небе.

Турбулентность ясного неба (ТЯН) достаточно трудно обнаружить визуально. В ведущих метеорологических центрах используются различные диагностические алгоритмы для расчета местоположения и зон ТЯН и оценки её интенсивности. Эти алгоритмы преимущественно основаны на характеристиках полей ветра, температуры и влажности, полученных по численным моделям прогноза погоды. Прогнозирование ТЯН осуществляется по косвенным признакам преимущественно в вероятностной форме с помощью физико-статистических зависимостей от специальных предикторов – индексов ТЯН, связь которых с повторяемостью болтанки самолетов определена статистически. Установлено [16], что из всех исследуемых параметров вероятность умеренной или сильной турбулентности наиболее связана с вертикальным сдвигом вектора ветра и числом Ричардсона (Ri). На этом основан вывод индекса ТЯН Колсона–Панофски [16], однако на модельных данных этот индекс практически не применялся из-за низкой точности расчета Ri по модельным данным с недостаточным для этой цели вертикальным разрешением. Широкое применение на практике получили индексы Эллрода и Кнаппа [18], которые учитывают деформацию горизонтального вектора ветра (растяжение, сжатие и конвергенцию) и вертикальный сдвиг ветра. Используется также множество других индексов, достаточно полный перечень которых приведен, например, в [14, 15]. Все используемые индексы разграничивают условия наличия или отсутствия турбулентности, влияющей на полет ВС, по пороговым значениям, которые определяются путем сравнения расчетов с данными о турбулентности по бортовым сообщениям AMDAR.

Учитывая вышеизложенное, при разработке метода прогноза интенсивности ТЯН для ДВ региона авторами был апробирован весьма широкий перечень наиболее часто используемых индексов ТЯН и индекс Колсона–Панофски. Перечень индексов и формул, по которым они рассчитываются, приведен в [10]. Для выбора

наиболее эффективных подходов выполнено большое количество численных экспериментов по оперативной [5] и экспериментальной [2] сборкам модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 15 км (31 вертикальный уровень) и 5 км (51 вертикальный уровень) соответственно. Исследования показали, что наиболее информативными на рассматриваемой территории являются индексы Колсона–Панофски и Эллрода–Кнаппа. Но индекс Эллрода–Кнаппа практически ничего не добавляет к определению наличия и интенсивности ТЯН в сравнении с индексом Колсона–Панофски и несколько «размывает» области слабой турбулентности, а также иногда формирует их там, где таковые не наблюдались. Статистические характеристики полей индекса Эллрода–Кнаппа менее устойчивы, имеют более выраженный разброс во времени, и, как следствие, труднее установить дискриминантные значения наличия/отсутствия ТЯН. Причиной этому, с точки зрения авторов, служит использование в формулах горизонтальных производных компонент скорости ветра, которые рассчитываются конечными разностями. Поэтому в разработанной авторами технологии прогноза зон наличия и интенсивности ТЯН используется индекс Колсона–Панофски с корректировкой дискриминантных значений для отделения зон наличия и классов интенсивности турбулентности ясного неба по данным бортовых сообщений. Выходная продукция представляется полями кодов максимальной интенсивности в каждом горизонтальном узле сетки для заданных эшелонов полета. Эти поля в формате GRIB2 доступны пользователям на ftp-сервере ФГБУ «Дальневосточное УГМС». Для визуального представления строятся карты-слайды полей интенсивности ТЯН по фиксированным эшелонам полетов. Примеры карт представлены на рис. 2.

На карты наносятся поля геопотенциала (черной линией), ветра на среднем уровне указанного слоя (серыми перьями – при скорости менее 25 м/с, фиолетовыми – при скорости более 25 м/с). Зоны слабой, умеренной и сильной ТЯН отмечены цветовой заливкой (голубой, синей и красной соответственно).

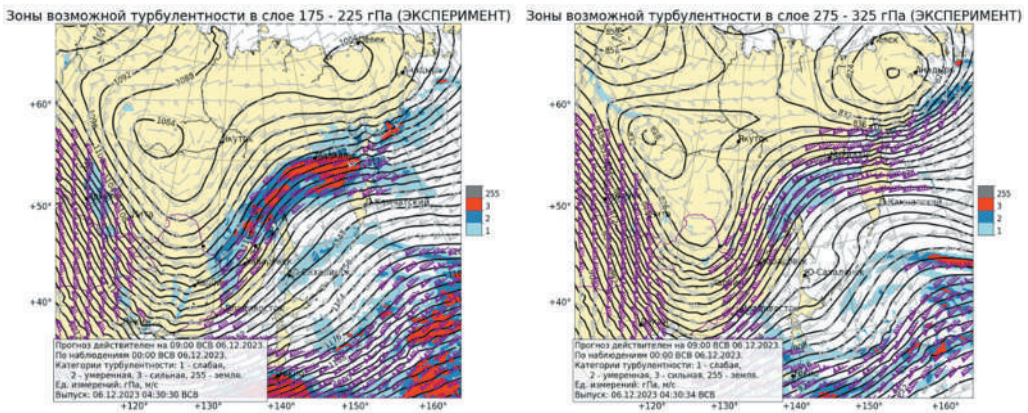


Рис. 2. Пример оперативного прогноза зон наличия и интенсивности ТЯН над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока России

Методология прогноза наличия и интенсивности горных волн на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока

Актуальность работы обусловлена практически полным отсутствием методов прогнозирования факта формирования, наличия и интенсивности горных волн (ГВ) на территории Российской Федерации вообще и на рассматриваемой территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, в частности. Визуальный анализ физической карты ДВ региона (рис. 3) показывает, что на данной территории ГВ в том или ином месте могут формироваться практически ежедневно, и прогнозирование их наличия, местоположения, вертикального развития и интенсивности, опасных для авиации, – весьма актуальная задача.

Основной сложностью решения поставленной задачи является практически полное отсутствие наблюдений и инструментальных измерений характеристик ГВ. Общие сведения о горных волнах, анализ условий их возникновения и существующие практики прогнозирования подробно изложены в [9].

Авторский опыт численного моделирования процесса возникновения, развития и затухания ГВ на реальных примерах, наблюдавшихся на юге о. Сахалин 13 июня и 14 августа 2014 г. при обтекании воздушным потоком Сусунайского хребта, представлен в [13].

Численные эксперименты по версии модели WRF-ARW 3.9.1 с горизонтальным шагом 1 км и 3 км, выполненные постфактум по небольшой территории, когда известно место и время исследуемого явления, показали, что модель вполне адекватно воспроизводит процессы формирования, развития и затухания ГВ.

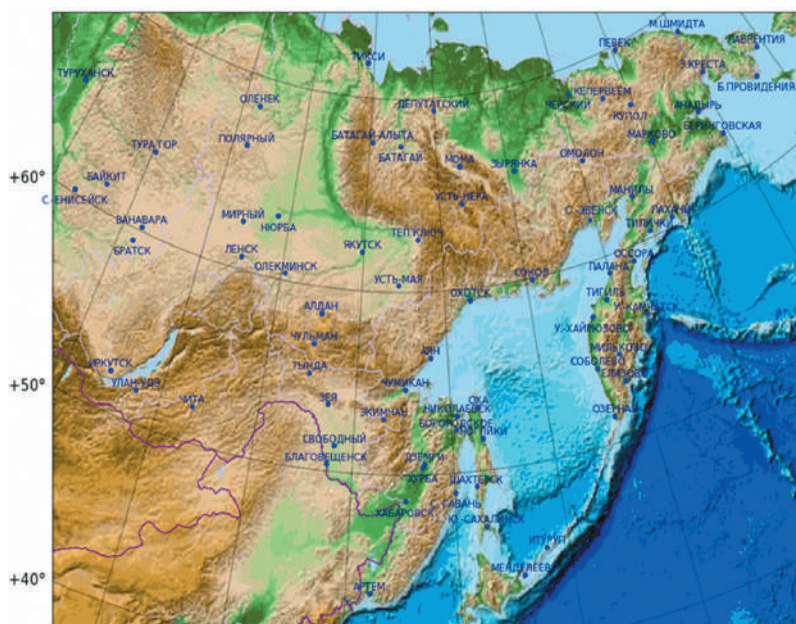


Рис. 3. Карта-схема Восточной Сибири и Дальнего Востока (с указанием основных аэродромов ДВ региона России)

Задача прогнозирования, в отличие от задачи моделирования, подразумевает определение места и времени возможного возникновения ГВ на обширной территории ДВ региона с большим количеством горных массивов и орографических неровностей различных форм и географической ориентации. При этом расчеты необходимо выполнять по модели с существенно большим горизонтальным шагом, чем 1 км, для получения прогноза в оперативные сроки. Поэтому была поставлена задача разработки методологии идентификации ГВ и оценки интенсивности вертикальных движений в ГВ для вариантов модели WRF-ARW с горизонтальным шагом более 3 км.

Известно [1, 6], что горные волны возникают в процессе обтекания орографических препятствий при выполнении совокупности следующих условий: неустойчивая термическая стратификация, скорость приземного ветра в набегающем потоке не менее 7–8 м/с, направление ветра практически перпендикулярно к препятствию. Выполнение первых двух условий легко определить по модельным данным. Компоненты вектора ветра (u , v , w) рассчитываются непосредственно в модели в каждом узле сетки в каждый момент времени соответственно шагу интегрирования модели. Степень устойчивости термической стратификации атмосферы в каждом горизонтальном узле модельной сетки в текущий момент времени определяется по значениям Lifted Index (LI) [19], представляющего собой разность между температурой окружающего воздуха на некоторой высоте и температурой частицы воздуха, адиабатически поднятой на эту высоту. Поэтому основной задачей прогнозирования ГВ по большой территории на основе численного моделирования является определение типа местности и формы рельефа, способной к формированию ГВ по модельной орографии.

Далее необходимо определить интервалы направления ветра, при которых возможно образование ГВ для каждого горизонтального узла модельной сетки, относящегося к форме рельефа, способной к генерации ГВ. Если в узлах модельной сетки, относящихся к формам рельефа, способным к генерации ГВ, прогнозируется устойчивая стратификация, скорость ветра превышает заданную величину, а направление ветра попадает в определенный интервал, то полагается, что в этих узлах формируются горные волны.

Совокупность узлов модельной сетки, относящихся к формам рельефа, способным к генерации ГВ, будем далее называть ареалами потенциального возникновения ГВ. А совокупность узлов модельной сетки, относящихся к ареалам потенциального возникновения ГВ, в которых выполняются метеорологические условия возникновения ГВ, далее будем называть узлами генерации ГВ. Очевидно, что ареалы потенциального возникновения ГВ постоянны и могут лишь незначительно меняться при изменении ориентации модельной сетки или её горизонтального шага. А совокупность узлов генерации ГВ зависит от текущих метеорологических условий и меняется в рамках ареалов потенциального возникновения ГВ в зависимости от изменения поля ветра и стратификации атмосферы. После определения зон возможной генерации ГВ в текущих метеорологических условиях нужно оценить параметры возникающих ГВ: длину волны и максимальную скорость вертикальных

перемещений воздушных масс за счет волнового движения. Завершающей задачей является определение ареалов распространения ГВ по горизонтали и вертикали.

Определение типа местности и форм рельефа по модельной орографии

Точного определения горной местности с точки зрения возникновения ГВ нет. В национальных авиационных правилах (РФ, США и ЕС) и рекомендациях ИКАО есть определения горной местности для установления минимальной высоты полета воздушных судов. Эти определения различны и трудно применимы для использования в автоматизированных технологиях прогнозирования ГВ по моделям ЧПП. Исследования показали, что параметры определения горной местности по документации РФ существенно более близки к рельефу местности, где наблюдается ГВ в ДВ регионе, чем параметры, определенные в документах США, Канады и ЕС (ИКАО). По регламентам РФ, в горной местности с абсолютной высотой рельефа менее 1000 м тангенс минимального угла наклона между высотами произвольных точек, расположенных друг от друга на расстоянии не более 25 км, должен составлять 0,02. Таким образом, к горной местности следует отнести те узлы модельной сетки, для которых либо высота не менее 1000 м, либо при высоте ниже 1000 м разность высот текущего узла модельной сетки с узлами, расположенными на расстоянии не более 25 км, не менее $0,02 \cdot \Delta x$, где Δx – горизонтальный шаг сетки. Остальные узлы сетки следует отнести к «не горной» местности. Результат применения такого подхода к делению узлов модельной сетки на горную и равнинную местность в ДВ регионе для вариантов модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км и 15 км представлен на рис. 4, из которого видно, что с увеличением горизонтального шага модели ареалы горной местности уменьшаются.

В результате применения предложенного подхода по высотам узлов модельной сетки с шагом 5 км к горной местности отнесены практически все орографические объекты, которые можно отнести к таковой согласно физической карте рассматриваемой территории. По высотам узлов модельной сетки 15 км крупные орографические объекты определяются хорошо, но часть более мелких, но важных объектов пропускается. Например, Сунайский хребет, в непосредственной близости от которого расположен аэродром Южно-Сахалинска; горные вершины

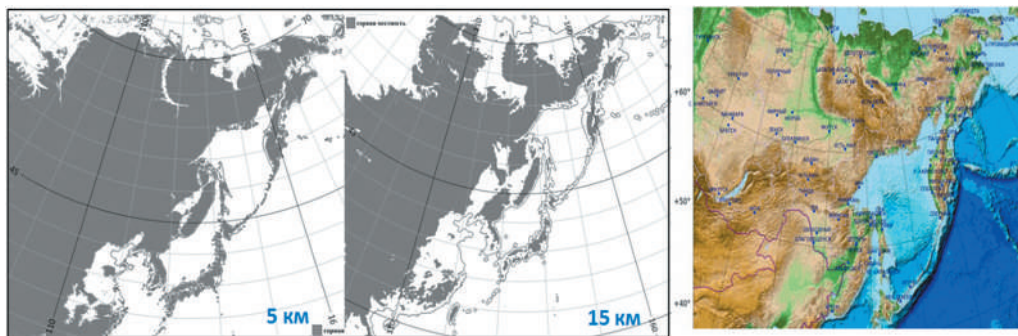


Рис. 4. Модельная горная местность (серой заливкой) согласно орографии WRF-ARW при различном горизонтальном шаге сетки

Курильских островов, на которых расположены аэродромы Итуруп, Менделеево (Южно-Курильск), Северо-Курильск; Золотой хребет вблизи аэродрома Угольные Копи (Анадырь); побережье ДВ морей и ряд других весьма важных с точки зрения решаемой задачи орографических объектов. В этой связи все разработки выполнялись по модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км.

В методологии полагается, что в узлах модельной сетки, отнесенных к «не горной местности», формирование ГВ невозможно. В узлах модельной сетки, отнесенных к горной местности, необходимо определить форму рельефа горной местности, так как не каждая форма рельефа способна генерировать горную волну. В методе рассматриваются следующие формы рельефа [3, 10]: холм, впадина, хребет, ложбина, склон, склон с ложбиной и плато. Полагается, что генерация ГВ возможна при формах рельефа «холм», «хребет», «склон», «склон с ложбиной». Формы рельефа «впадина», «ложбина», «плато» ГВ не генерируют.

Определение форм рельефа основано на анализе соотношений высот текущего узла модельной сетки и узлов окружения. Полное описание метода определения форм рельефа весьма объемно и здесь не приводится. Программное средство, реализующее алгоритм определения горной местности и форм рельефа по модельной орографии зарегистрировано в Федеральном институте промышленной собственности в виде программы для ЭВМ [12]. Результат применения метода определения форм рельефа по данным WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км на всей территории области прогноза представлен на рис. 5.

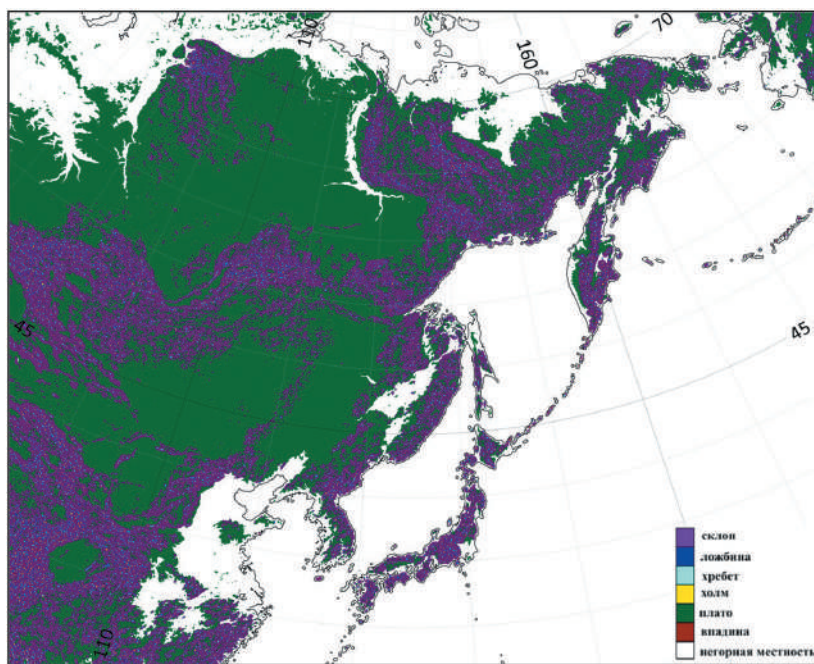


Рис. 5. Формы рельефа горной местности, рассчитанные по орографии модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км

Эффективность метода проиллюстрирована рисунками 6 и 7. На рис. 6 представлен юго-восточный фрагмент рассматриваемой территории, на котором отчетливо виден Сусунайский хребет. На рис. 7 представлен северо-восточный фрагмент территории, на котором отмечен Золотой хребет.

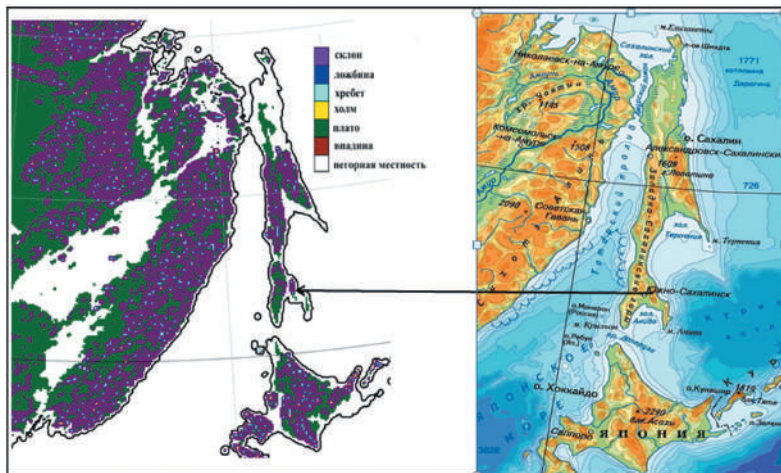


Рис. 6. Формы рельефа горной местности, рассчитанные по модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км юго-востока ДВ (стрелкой указан Сусунайский хребет)

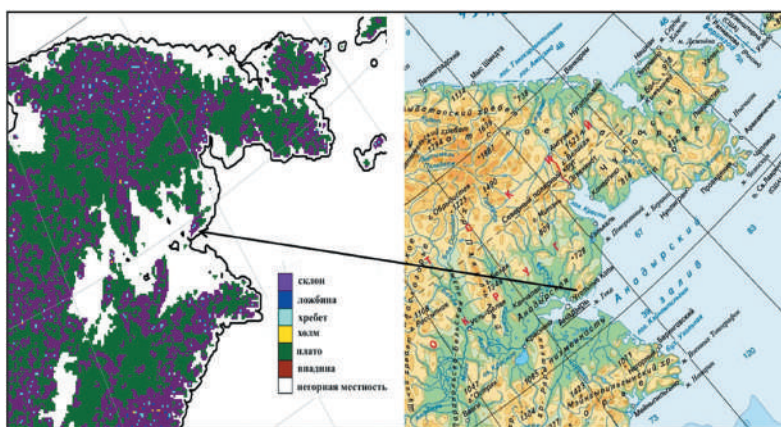


Рис. 7. Формы рельефа горной местности, рассчитанные по модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км северо-востока ДВ (стрелкой указан Золотой хребет)

На основе разработанной методологии [3] определяется принадлежность каждого узла модельной сетки, отнесенного к горной местности, к какой-либо форме рельефа. Если узел отнесен к одной из форм рельефа, способной к генерации ГВ, то он относится к ареалу потенциального возникновения ГВ.

На рис. 8 представлена визуализация ареалов потенциального возникновения ГВ на рассматриваемой территории, построенная по орографии модели WRF-ARW

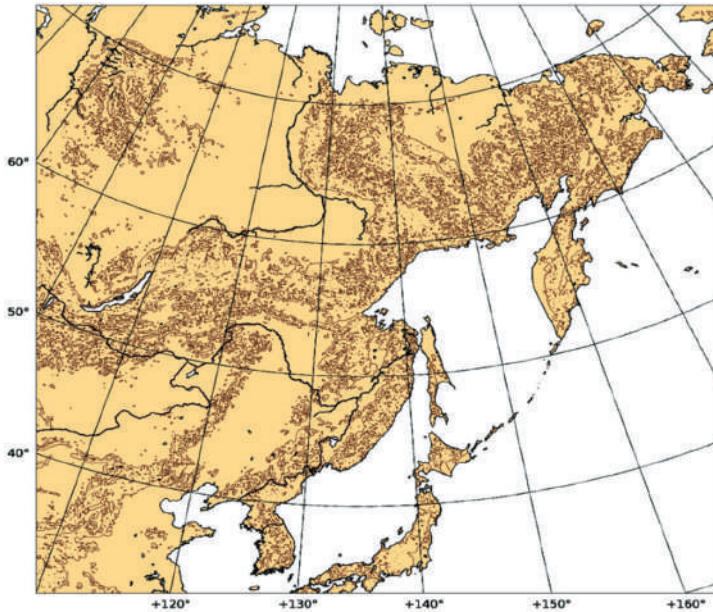


Рис. 8. Ареалы возможного возникновения ГВ на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока (коричневые точки)

с горизонтальным шагом 5 км методом определения форм рельефа в совокупности с положением о формах рельефа, способных к генерации ГВ. Наноска ареалов потенциального возникновения ГВ используется в географической подложке при построении карт-слайдов прогноза элементов ГВ.

Определение направления ветра, при котором может возникнуть ГВ

Для каждого горизонтального узла модельной сетки, отнесенного к горной местности с формой рельефа, допускающей генерацию ГВ, определяются интервалы направления ветра, при которых может возникнуть ГВ. В узлах сетки, определенных как «холм», генерация ГВ возможна при любом направлении приземного ветра. В узлах сетки, определенных как «хребет», горная волна может возникать при направлении ветра, перпендикулярном к направлению хребта или близком к перпендикулярному. В узлах сетки, определенных как «склон», для генерации ГВ ветер должен дуть в сторону склона. В узлах сетки, определенных как «склон с ложбиной», для генерации ГВ ветер должен дуть вдоль ложбины в сторону склона.

Для определения интервалов направления ветра необходимо определить направление рельефа для каждого узла модельной сетки, отнесенного к формам рельефа типа хребет, склон, склон с ложбиной.

Для текущего узла (i, j) , отнесенного к форме «хребет», из совокупности узлов окружения определяется точка k_1 , направление на которую считается направлением «хребта». Далее определяется угол $\alpha(k_1)$, который составляет прямая, соединяющая точки (i, j) и k_1 , с меридианом, проходящим через точку (i, j) . Тогда метеорологическое направление ветра $ddd(i, j)$ в узле (i, j) должно удовлетворять одному из неравенств:

$$\alpha(k_1) + (90^\circ - \delta^\circ) \leq ddd(i, j) \leq \alpha(k_1) + (90^\circ + \delta^\circ) \quad (2)$$

$$\alpha(k_1) + (270^\circ - \delta^\circ) \leq ddd(i, j) \leq \alpha(k_1) + (270^\circ + \delta^\circ), \quad (3)$$

где δ° – допустимое отклонение от основного направления – перпендикуляра к хребту.

Для узлов сетки, определенных как «склон», точка k_1 – это точка максимального уклона от узла (i, j) вверх по склону. Для возникновения ГВ в таких узлах ветер должен дуть в сторону склона, то есть направление ветра $ddd(i, j)$ должно удовлетворять условию

$$\alpha(k_1) - \delta^\circ \leq ddd(i, j) \leq \alpha(k_1) + \delta^\circ. \quad (4)$$

В узлах формы «склон с ложбиной» горная волна может возникать только при ветре, направленном вдоль ложбины в сторону склона. Здесь k_1 – это точка, для которой $|\Delta h(i, j, k_1)| < \Delta h_0$, где Δh_0 – критическое значение разности высот узлов сетки, менее которого узлы считаются находящимися на одном уровне. Направление ветра в узле (i, j) должно удовлетворять условию (4).

Иллюстрация работы методологии представлена на рис. 9 на примере прогноза на 03 ВСВ 11 ноября 2021 г. от срока 12 ВСВ 10.11.2021 г. Для иллюстрации выбрана дата и срок прогноза, для которого есть спутниковые снимки со специфической облачностью одновременно в четырех местах области прогноза, что встречается редко.

На рис. 9 синей заливкой отмечены территории с прогнозируемой устойчивой стратификацией. Красными «перьями» нанесено текущее поле ветра при скорости не менее 7 м/с. Синими линиями обозначены линии тока. Розовым отмечены ареалы форм рельефа горной местности, где потенциально возможна генерация ГВ. Справа представлены фрагменты спутниковых снимков на сроки, близкие к сроку прогноза, на которых наблюдается чечевицеобразная облачность, которая образуется в гребнях ГВ при достаточной высокой интенсивности восходящих потоков и достаточной влажности поднимающихся ВМ.

Видно, что при текущем состоянии поля приземного ветра и индекса LI более 0 °C прогнозируемые ареалы возможной генерации ГВ совпадают с местоположением специфической чечевицеобразной облачности, полученной на спутниковых снимках.

На основе представленной методологии разработана оперативная технология прогноза ареалов возникновения ГВ на территории ДВ региона по данным модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км. На рис. 10 приведены примеры оперативных прогнозов, рассчитанных от срока 00 ВСВ 24.11.2022 г. на 24 и 60 часов вперед. Места генерации ГВ в прогнозируемых метеорологических условиях отмечены зелеными точками. Для наглядности добавлено поле ветра перьями при скорости не менее 5 м/с. Представленные карты демонстрируют изменение местоположения ареалов генерации ГВ в соответствии с динамикой полей ветра и стратификацией атмосферы. Чтобы не загружать карты обилием информации, поле стратификации не наносится. В любом случае оно меняется существенно медленнее, чем поле ветра.

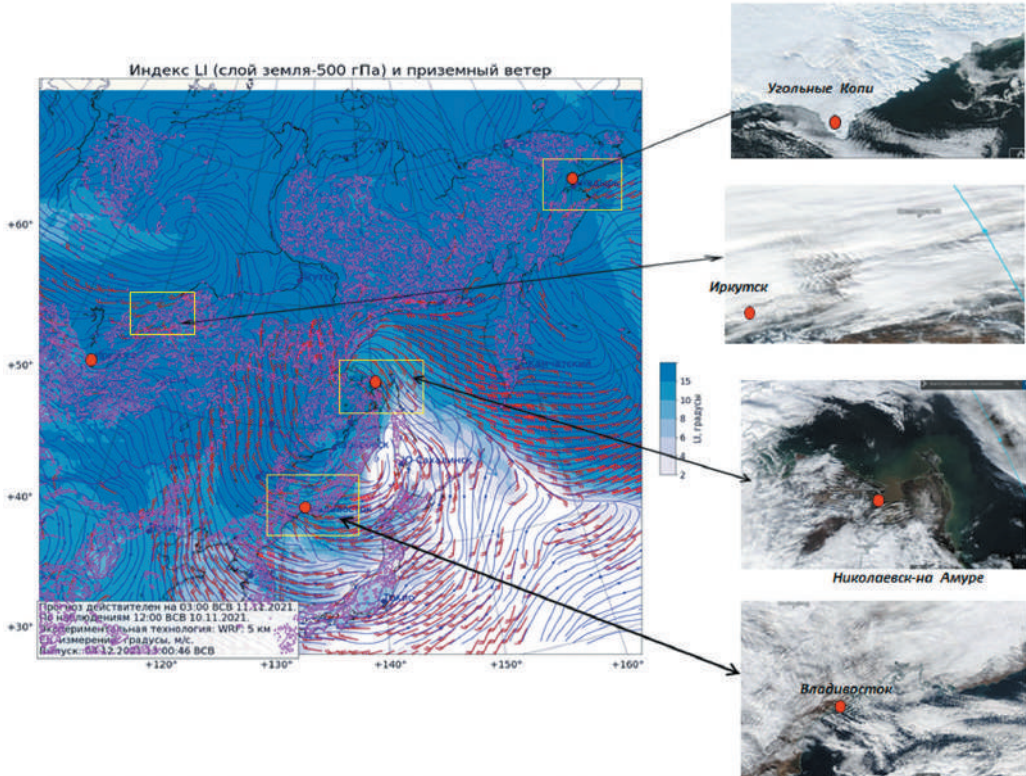


Рис. 9. Ареалы горной местности с формой рельефа, способной к генерации ГВ, определенные по высотам узлов сетки модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км

Оценка параметров горных волн и ареалов распространения

Оценка параметров ГВ в методологии опирается на теоретические основы, представленные в трудах Скорера и Дородницына, а также анализах теоретических положений и данных наблюдений, приведенных в [11] и [19]. Длина волны в узлах генерации оценивается по хорошо известной специалистам в области изучения ГВ приближенной формуле Скорера:

$$\lambda \approx 2\pi \cdot U \cdot \left\{ \frac{T}{g(\Gamma - \Upsilon)} \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

где λ – длина волны, U – среднее значение горизонтальной составляющей скорости ветра, перпендикулярной к препятствию, π – число π ($\approx 3,14$), Γ – адиабатический вертикальный градиент температуры, Υ – фактический вертикальный градиент температуры $\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$, g – ускорение свободного падения. Оценка максимальной вертикальной скорости выполняется на основе соотношения средней амплитуды и длины волны. Средняя амплитуда волны в нижнем слое над подстилающей поверхностью полагается равной высоте препятствия.

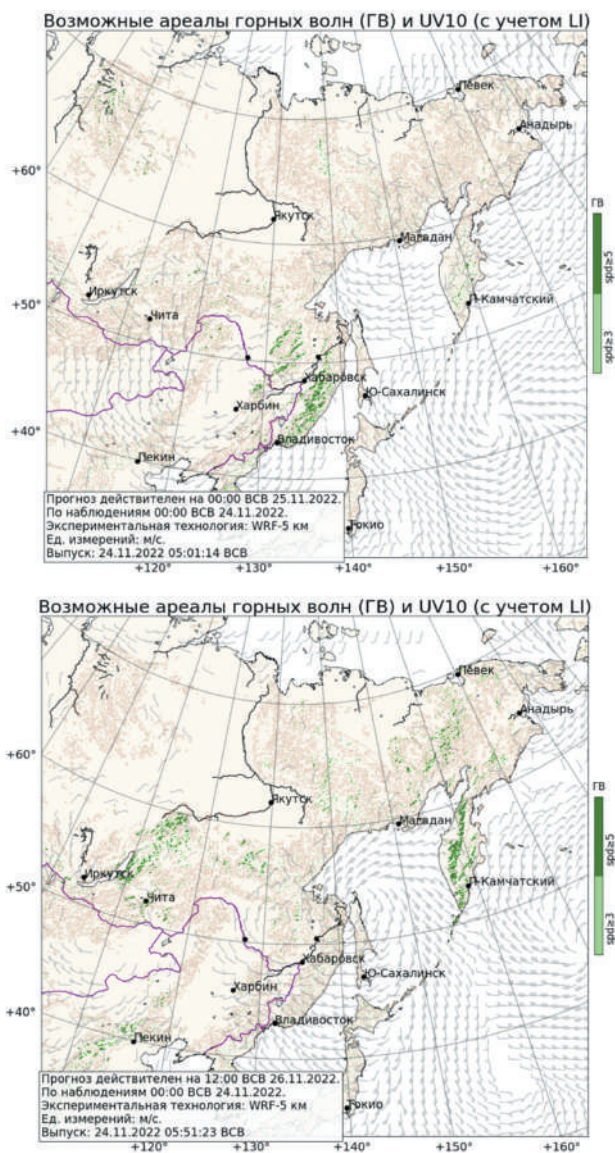


Рис. 10. Ареалы генерации ГВ по модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км

Ареал распространения ГВ из узла генерации в горизонтальном направлении определяется в зависимости от длины волны и рельефа местности в направлении распространения волны. Если в направлении распространения нет орографических препятствий (например, морская поверхность), то расстояние распространения возмущения ограничивается согласно данным спутниковых снимков 10–12 длинами волн. Если в направлении горизонтального распространения ГВ встречается орографическое препятствие, то расстояние, на которое распространяется волновое возмущение, ограничивается этим препятствием.

При оценке распространения волнового возмущения в вертикальном направлении атмосфера рассматривается как слоистая среда. В рамках модельного процесса атмосферные слои ограничиваются вертикальными уровнями модели. Если в каком-либо слое вертикальная скорость волнового движения равна нулю, то полагается, что в данном слое расположена узловая поверхность. Если в каком-либо слое значение $\Gamma - \Upsilon < 0$, то полагается, что условий для дальнейшего распространения волны по вертикали нет.

Уточнение значений волновых параметров, рассчитанных на основе теоретических положений и постулатов методологии, выполняется посредством расчета этих параметров по модели с горизонтальным шагом 1 км для случаев, когда наличие ГВ показано наблюдавшейся чечевицеобразной облачностью в географической локализации, близкой к какому-либо пункту радиозондирования, т. е. там и тогда, где и когда наличие ГВ подтверждается спутниковыми снимками, а результаты модельных расчетов могут быть проверены и откалиброваны данными наземных и аэрологических наблюдений.

Численное прогнозирование наличия и параметров пыльных и песчаных бурь на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока

Пылевые явления на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока РФ наблюдаются повсеместно и не только в весеннее время года [7, 10]. Нередко, при определенных условиях, пылевые явления могут достигать критериев пыльных (песчаных) бурь (ППБ), представляющих опасность для человеческой деятельности, объектов промышленной инфраструктуры и авиационного транспорта. Основной причиной ППБ на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока является эмиссия пыли, возникающая в процессах сальтации и дробления крупных микрочастиц на более мелкие в ветропесчаном потоке над почвогрунтами пустынь Центральной Азии. В сочетании с благоприятными условиями трансграничного переноса пыли в атмосфере, в число которых входит механизм накопления минерального аэрозоля между задерживающими слоями температурной инверсии (двойная инверсия), пыль в атмосфере может перемещаться на огромные расстояния, определяя погодные условия на больших пространствах [17]. В общем случае вынос облаков пыли во все сезоны года на южные районы Восточной Сибири и Дальнего Востока тесно связан с расположением центров действия атмосферы и направлением воздушных потоков из районов пустыни Гоби и Лёссового плато в Китае.

Технология прогнозирования ППБ на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока РФ (и прилегающих территорий) на основании модели WRF-ARW-Chem (далее WRF-Chem) разработана авторами данной статьи в рамках НИР 1.4.2.2 и проходит тестирование с 2021 г. [10]. В данной статье рассматривается только прогноз содержания минеральных микрочастиц PM10 в нижней и средней тропосфере. Дальность видимости, обусловленная пылью, может быть оценена путём известных эмпирических взаимосвязей с содержанием микрочастиц PM10 (в $\text{мкг}/\text{м}^3$).

На основании большого количества численных экспериментов была выбрана оптимальная конфигурация модели WRF-Chem с горизонтальным шагом 20 км

(43 вертикальных уровня). В качестве основной схемы эмиссии пыли выбран метод AFWA [22], в которой используются пять категорий микрочастиц со средним эффективным радиусом 0,55; 1,4; 2,4; 4,5 и 8 мкм. Более крупные микрочастицы участия в переносе пыли в атмосфере практически не принимают и в схеме не учитываются. При расчётах в схеме AFWA принимается, что общий поток пыли, возникающий при сальтации, для каждой категории микрочастиц со своим средним эффективным радиусом вызывается сдвигом ветра вблизи совершенно лишенной растительности поверхности почвогрунта, при превышении некоторого порога скорости ветра. Порог скорости ветра в схеме AFWA свою очередь, зависит от шероховатости подстилающей поверхности и влажности почвогрунта. Информация о влажности почвогрунта определяется в модели WRF-Chem на каждом расчётном шаге по времени, исходя из работы блока параметризации, отвечающего за процессы в почве – схемы Noah. Заметим, что в схеме Noah изменения величины влажности почвогрунта учитывают испарение с поверхности почвогрунта и выпадающие накопленные атмосферные осадки с учётом динамики тепла и влаги между слоями почвогрунта.

Вертикальный поток пыли, возникающий согласно закону Бернулли, зависит от суммарной эродируемости почвогрунта, определяемой наличием трёх составляющих (глинозем, песок, ил) в разных пропорциях на единицу площади расчётной ячейки модели. В текущей версии модели WRF-Chem эродируемость (по данным трёх почвенных фракций) основана на данных измерений характеристик подстилающей поверхности оперативными полярными ИСЗ серии NOAA радиометром высокого разрешения AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [20]. На рис. 11 приведено распределение суммарной эродируемости почвы по району расчёта модели WRF-Chem.

По умолчанию в схеме AFWA принимается распределение повторяемости микрочастиц пыли по размерам, полученное на основе некоторых теоретических соображений, на основе эмпирических данных пустынь Северной Америки и Северной Африки. Однако, как показано в работе Шу и Фанга [26], фактическое распределение повторяемости микрочастиц пыли по размерам для разных районов земного шара может сильно отличаться от принятого по умолчанию в схеме AFWA, что показано на рис. 12. Для распределения повторяемости микрочастиц пыли по размерам по умолчанию характерен максимум в районе 5 мкм. Для пустынь КНР и Монголии, входящих в Азиатский пустынный пояс, максимум повторяемости микрочастиц пыли смещен в сторону более низких значений около 2,5 мкм. Для использования параметров распределения повторяемости микрочастиц пыли, характерных для пустыни Гоби, исходный код модели WRF-Chem был модифицирован авторами данной статьи.

На рисунке 13 приведен типичный пример экспериментального прогноза содержания микрочастиц PM10 для случая прохождения ППБ с 14 по 19 мая 2019 г. через пункт Благовещенск.

В качестве эталона – фактического содержания микрочастиц PM10 использовался реанализ CAORA (Chinese Air Quality Reanalysis) содержания основных

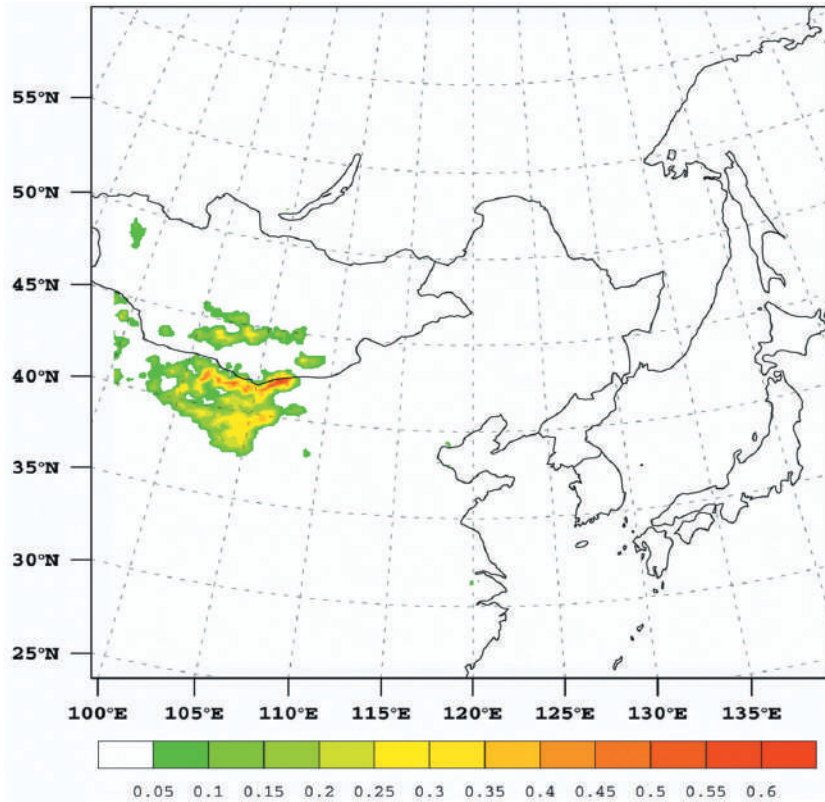


Рис. 11. Распределение суммарной эродуемости почвогрунтов по району расчёта модели WRF-Chem

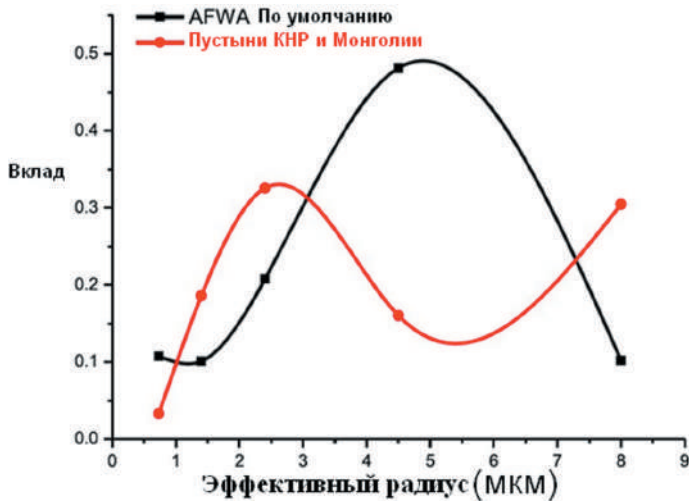


Рис. 12. Распределение частиц пыли по размерам (мкм): по умолчанию в схеме AFWA (чёрная линия) и использованная в модели WRF-Chem-ДВ (красная линия)

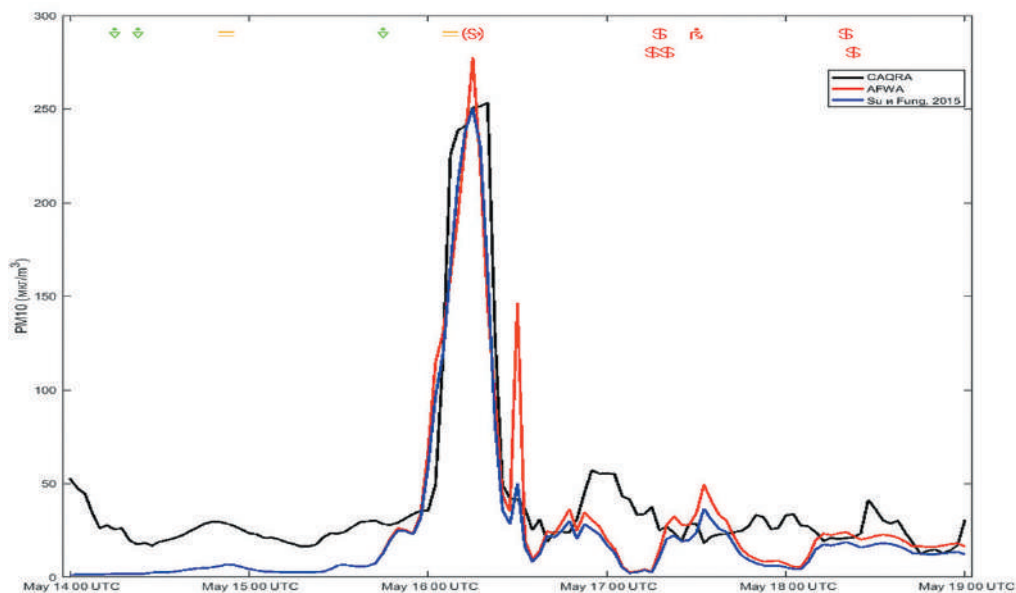


Рис. 13. Пример расчёта часовых концентраций PM10 для пункта Благовещенск с 14 по 19 мая 2019 г. по модели WRF-Chem: с использованием стандартной схемы AFWA (красная линия) и модифицированной (синяя). Черным цветом обозначены данные архива CAORA

загрязнителей атмосферы с высоким временным (1ч) и пространственным (15 км) разрешением [21].

Для наглядности на рис. 13 нанесены значки метеорологических явлений. Сравнительно неплохое совпадение факта и прогнозов часовых концентраций PM10 во время прохождения пыльной бури говорит об исключительно адвективной природе анализируемой ППБ. В результате численных экспериментов было получено, что величины средней абсолютной ошибки прогноза часовых значений концентраций PM10 близки к местным фоновым значениям (до и после прохождения ППБ). Этим фактом подтверждается, что модель WRF-Chem ориентирована, прежде всего, на прогноз пиковых концентраций микрочастиц PM10, т. е. выполняет свою задачу – прогнозирование ППБ. Для прогноза фоновых концентраций микрочастиц PM10 следует использовать другую специализированную модель переноса пыли.

В целом, по результатам численных расчётов, авторами данной работы было подтверждено, что улучшение качества прогноза часовых концентраций PM10 на 6 % (с 19,2 и 18,1 мкг/м³) достигается при использовании распределения частиц пыли по размерам, характерным для пустынь КНР и Монголии. Кроме выдачи данных часовых концентраций PM10, блок постпроцессинга модели WRF-Chem может выдавать параметр «дальность видимости на высотах полёта», обусловленный наличием пыли в атмосфере, с выдачей основных метеорологических переменных на требуемых стандартных уровнях полета ICAO.

Заключение

Таким образом, в результате работ по теме 1.4.2 Плана НИТР Росгидромета в период 2020–2024 гг. разработаны методы и технологические решения для производства и выпуска краткосрочных прогнозов опасных для авиации явлений погоды: зон возможного обледенения воздушных судов с выделением зон умеренной и сильной интенсивности, наличия и интенсивности турбулентности ясного неба, местоположения формирования и характеристик (интенсивность вертикальных движений и ареалы распространения) горных волн, возникновения, развития и интенсивности пыльных бурь. Все технологии развернуты на вычислительных ресурсах ФГБУ «Дальневосточное УГМС» и подготовлены к выпуску перечисленных видов прогнозов для метеорологического обслуживания авионавигации на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России.

Литература

1. Барри Р.Г. Погода и климат в горах – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 312 с.
2. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Использование высокопроизводительной вычислительной техники для численного моделирования и прогнозирования опасных для авиации явлений погоды в дальневосточном регионе // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления. Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Хабаровск, 2021. – С. 40–45.
3. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Определение типа и формы рельефа в методологии прогноза горных волн по негидростатической региональной модели численного прогноза погоды высокого пространственного разрешения // Марчуковские научные чтения-2022: Тезисы Междунар. конф., 3–7 октября 2022 г. – Новосибирск, 2022. – С. 74.
4. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Опыт применения численных прогнозов погоды для метеорологического обслуживания авиации в дальневосточном регионе России // Метеоспектр, 2017. – № 2. – С. 117–123.
5. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Применение высокопроизводительных систем для численного прогноза погоды в дальневосточном регионе России // Вестник ТОГУ, 2015. – № 3 (38). – С. 131–140.
6. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность в свободной атмосфере // Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 288 с.
7. Крохин В.В., Котович Н.Г., Павлюк Л.В. О пространственных и временных характеристиках переноса пыльных и песчаных бурь юга Дальнего Востока России в весенний период // Труды ДВНИГМИ. – Вып.156. – 2021. – С. 102–110.
8. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Метеорологическое обеспечение международной авионавигации // Международная организация гражданской авиации, 2016. – 218 с.
9. Разработка технологии сверхкраткосрочного (до 12 ч) прогноза погоды опасных для авиации явлений в целях создания на территории Российской Федерации Регионального консультативного центра по опасным для авиации явлениям погоды: Отчет по НИР (промежуточный). Отв. исп. Колкер А.Б., исполнители Вербицкая Е.М., Иванова А.Р. Шифр. темы 1.4. Новосибирск, 2020. 159 с. Рег. № НИОКТР АААА-А20-120012890067-4. Рег. № ИКРБС АААА-Б21-221010290002-5.
10. Разработка технологии сверхкраткосрочного (до 12 ч) прогноза погоды опасных для авиации явлений в целях создания на территории Российской Федерации Регионального консультативного центра по опасным для авиации явлениям погоды: Отчет по НИР (про-

межуточный). Отв. исп. Колкер А.Б., исполнители Вербицкая Е.М., Иванова А.Р. – Шифр. темы 1.4. – Новосибирск, 2023. – 119 с. – Рег. № НИОКТР 122041100028-5 – Рег. № ИКРБС АААА-Б21-221010290002-5.

11. РД 52.27.724-2019 «Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения» – URL: <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/RHM/nast-KPP-2019.pdf> (дата обращения: 10 января 2023 г.).

12. Романский С.О., Вербицкая Е.М. Программа расчета типов и форм рельефа в узлах модельной сетки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2922613563 от 14 марта 2022 г.

13. Романский С.О., Вербицкая Е.М. Сильные шквалистые ветры в Южно-Сахалинске летом 2014 г. // *Геосферные исследования*, 2023. – № 4. – С. 3–12.

14. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации // М.: Триада ЛТД, 2016. – 312 с.

15. Aviation turbulence: processes, detection, prediction // By ed. R. Sharman, T. Lane. Switzerland: Springer international publishing, 2016. – 538 p.

16. Colson D., Panofsky H.A. An index of clear-air turbulence // *Quart. J.R. Meteor. Soc.* 1965. – Vol. 91. – P. 507–513

17. Eliassen A. Atmospheric motions of different scales and their transport capacities // *Optical and Quantum Electronics*, 1976. – Vol. 8. – P. 105–115.

18. Ellrod G.P., Knapp D.I. An objective clear air turbulence forecasting technique: verification and operational use // *Wea. Forecasting*, 1992. – Vol. 7. – P. 150–165.

19. Galway J.G. The lifted index as a predictor of latent instability // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1956. – V. 37(10). – P. 528–529.

20. Ginoux P., Chin M., Tegen I., Prospero J.M., Holben B., Dubovik O., Lin S.J. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model // *J. Geophys. Res.*, 2001. Vol. 106(D17). – P. 20255–20273.

21. Kong, L. A 6-year-long (2013–2019) high-resolution air quality reanalysis dataset in China based on the assimilation of surface observations // *Earth System Science Data* – 2021. – Vol. 13, No. 2. – P. 529–570.

22. LeGrand S. L., Polashenski C.; Letcher T.W., Creighton G., Peckham A.; Cetola S.E. The AFWA dust emission scheme for the GOCART aerosol model in WRF-Chem v3.8.1 // *Geosci. Model Dev.*, 2019. – Vol. 12, No.1. – P. 131–166.

23. Schultz P., Politovich M.K. Towards the improvement of aircraft-icing forecasts for the continental United States // *Weather and Forecasting*. – 1992. – Vol. 7. – P. 491–500.

24. Sharman R., Tebaldi C., Wiener G., Wolff J. An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting // *Wea. Forecasting*, 2006. – Vol. 21. – P. 268–287.

25. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., et al. A description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). 2008, University Corporation for Atmospheric Research, 125 p. URL: <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:500> (дата обращения 30.01.2021).

26. Su L., Fung J. Sensitivities of WRF-Chem to dust emission schemes and land surface properties in simulating dust cycles during springtime over East Asia // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2015. – Vol. 120, No 21. – P. 11215–11230.

27. Thompson G., Bruintjes R.T., Brown B.G., Hage F. Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part I: WISP94 real-time icing prediction and evaluation program // *Weather and Forecasting*. – 1997. – Vol. 12. – P. 848–889.

28. Verbitskaya E., Romanskiy S. Forecasting of possible aircraft icing based on output of the WRF-ARW model. Proceedings of the 18th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2021), August 1–6, 2021, Singapore.

О КАЧЕСТВЕ ПРОГНОЗОВ НОВОЙ СИСТЕМЫ КРАТКОСРОЧНОГО ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОГОДЫ «ХАБ-5» В ПУНКТАХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

Введение

Одним из основных направлений научной деятельности ФГБУ «ДВНИГМИ» является разработка, развитие и поддержание функционирования системы численных прогнозов погоды (системы ЧПП) для территории Дальнего Востока и Восточной Сибири РФ и прилегающих территорий. В качестве базовой модели системы ЧПП в ДВ-регионе РФ по рекомендации Росгидромета принята модель WRF-ARW [13]. Прогнозы по этой модели в версии 3.9.1 с набором параметризаций, наиболее подходящих к физико-географическим условиям рассматриваемой территории, рекомендованы решением ЦМКП от 25 мая 2015 г. в качестве основных численных прогнозов на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России [4]. Модель эксплуатировалась в статусе оперативной с горизонтальным разрешением 15 км и 31 уровнем по вертикали, что позволяло выполнять расчеты прогнозов и подготовку выходной продукции в оперативные сроки на имевшихся в то время вычислительных ресурсах ФГБУ «Дальневосточное УГМС» (суперкомпьютер SGI Altix 4700 производительностью 0,7 ТФлопс).

Процесс развития и совершенствования системы ЧПП заключался в развитии системы постпроцессинга для построения карт-слайдов с набором различным метеорологических параметров, формированию таблиц прогноза основных элементов погоды в пунктах, а также разработке методов расчета различных метеорологических параметров по запросам потребителей – УГМС ДВ-региона [2, 3, 8]. Кроме того, выполнялись различные численные эксперименты и разработки по указанной модели с малым шагом по пространству (в т. ч. на вложенных сетках) для понимания перспектив и возможностей модели прогнозировать опасные явления погоды и специфические атмосферные процессы [9, 10, 15].

Эксперименты показали, что детализация пространственного разрешения (уменьшение горизонтального шага сетки и увеличение вертикальных уровней) существенно расширяет возможности использования модельных данных для прогнозирования локальных и опасных явлений погоды, а также для более детального описания прогнозируемых процессов и явлений в крупных населенных пунктах за счет увеличения количества узлов модельной сетки, попадающей на территорию крупных городов ДВ-региона или водосборов рек (что особенно важно для прогноза дождевых паводков на не слишком крупных реках).

Так, по модели с горизонтальным шагом 5 км на территорию г. Хабаровска попадает 14 узлов модельной сетки, а по модели в 15 км – всего 4 узла. Для Владивостока – 17 и 5 узлов соответственно. Для Петропавловска-Камчатского – 5 узлов

и 2 узла и т. д. Очевидно, что производственная эксплуатация модели с более мелким горизонтальным шагом весьма желательна, т. к. открывает широкие возможности для развития численных прогнозов погоды на рассматриваемой территории.

С установкой в ФГБУ «Дальневосточное УГМС» в 2018 г. новой высокопроизводительной вычислительной техники (на основе кластера CRAY XC-40) появилась возможность расчета модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км в оперативные сроки по весьма обширной территории ДВ-региона РФ (рис. 1). Здесь важно смещение Чукотского полуострова на достаточное расстояние от границ области прогноза, охват Новосибирских островов и расширение территории прогноза к западу, т. е. включение в область прогноза всех необходимых территорий обслуживания и влияния.

Процесс подготовки модели и технологии её расчета в оперативные сроки подробно представлен в [6, 14]. Перспективы использования и развития приведены в [1]. Эффективность использования модели с высоким горизонтальным и вертикальным разрешением на территории ДВ-региона подтверждена исследованиями и разработками опасных для авиации явлений погоды (прогноз горных волн и турбулентности ясного неба), выполненными авторами данной статьи в 2020–2023 годы [7].

Прогнозы полей метеоэлементов, элементов и явлений погоды в пунктах, а также других параметров состояния атмосферы рассчитываются по новой системе ЧПП на базе модели WRF-ARW с шагом горизонтальной сетки 5 км и 51 уровнем по вертикали с 2022 г. в оперативном режиме в статусе экспериментальных прогнозов. Для присвоения системе статуса «оперативных прогнозов» необходимо проведение производственных испытаний и представления результатов на ЦМКП Росгидромета [11]. Согласно регламенту Росгидромета, оперативно-производственные испытания предваряются авторскими испытаниями. Такие испытания были выполнены авторами данной работы в 2023 г. Результаты испытаний представлены в данной статье.

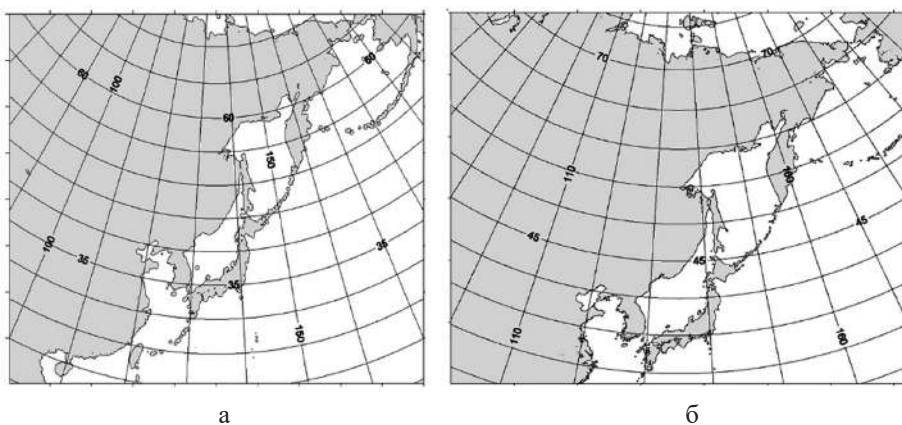


Рис. 1. Область прогноза систем ЧПП для ДВ-региона: а) 15 км; б) 5 км

Порядок проведения испытаний

В период с июня 2022 г. по декабрь 2023 г. накапливались расчеты по модели WRF-ARW с шагом горизонтальной сетки 5 км и 51 уровнем по вертикали для дальнейшего расчета оценок качества прогнозов. Оценки выполнялись по прогнозам от срока 0 ч. всемирного согласованного времени (BCV) с заблаговременностью от 12 до 72 ч и детализацией 3 часа соответственно основным срокам наблюдений. За прогностические значения элементов погоды в пунктах принимались данные из ближайшего узла модельной сетки согласно рекомендациям ВМО [5].

Числовые характеристики качества прогнозов, рассчитанных по новой версии сборки модели, сравнивались с аналогичными характеристиками оперативной версии модели.

Оценки качества рассчитывались согласно методическим рекомендациям и наставлениям [11, 12]. Фактические данные о приземном давлении, температуре, точке росы, скорости и направлении ветра на высоте 10 м и полусуточных суммах осадков взяты из сводок КН-1 (SYNOP) полученных от метеорологических пунктов наблюдений.

Целью работы являлась оценка степени успешности прогнозов по версии модели с шагом 5 км, сравнение с качеством оперативной версии модели (с шагом 15 км и 31 уровнем по вертикали) для выявления наличия или отсутствия преимуществ на одинаковом наборе исходных сроков и заблаговременностей прогноза. Работа выполнена в рамках темы 1.3 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 годы.

Далее по тексту используются термины: система ЧПП «Хаб-15» и «Хаб-5» для краткого обозначения систем численных прогнозов погоды на базе модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 15 км и 5 км и 31 и 51 уровнями по вертикали соответственно.

Оценки качества прогноза приземного давления

Осредненные оценки качества прогнозов приземного давления (P_s) для системы ЧПП «Хаб-5» представлены в табл. 1 за весь рассматриваемый период испытаний и посезонно. Здесь и далее в таблицах для краткости изложения приводятся оценки только для «Хаб-5» и значения отклонения оценок от контрольных («Хаб-15»). Оценки за весь период испытаний даны для заблаговременностей от 12 до 72 часов. Посезонно приведены средние значения оценок для совокупности заблаговременностей {12, 36 и 60 ч.} и {24, 48 и 72 ч.}, так как для рассматриваемой территории они соответствуют периодам дня и ночи и их значения достаточно близки друг другу.

Символом Δ^* отмечены значения отклонений оценок: положительное значение указывает на превышение качества прогноза «Хаб-5» над «Хаб-15» (например, уменьшение абсолютной ошибки или увеличение оправдываемости или обеспеченности прогноза).

Отрицательные значения указывают на снижение качества прогнозов испытываемой модели на рассматриваемой выборке. Нулевые значения показывают, что изменений в качестве прогнозов нет.

**Таблица 1. Оценки качества прогноза приземного давления
в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока России**

	Заблаговременность, ч	N	Статистические характеристики				P, %		
			$\hat{\delta}$, гПа	δ , гПа	δ_{ϕ} , гПа	ε	≤ 1 гПа	≤ 3 гПа	≤ 5 гПа
июнь 2022 г. – декабрь 2023 г., 284 пункта наблюдений									
Хаб-5	12	166 120	-0,4	2,4	2,6	0,92	43	78	91
	24	162 307	0,0	2,4	3,0	0,80	44	77	90
	36	161 686	-0,4	2,6	3,9	0,67	40	74	89
	48	162 505	-0,1	2,7	3,9	0,69	40	74	88
	60	161 295	-0,6	2,9	4,4	0,66	37	70	86
	72	161 321	-0,3	2,9	4,4	0,66	37	70	86
Среднее			-0,3	2,6	3,7	0,73	40	74	88
Δ^*	12	166 120	0,8	0,3	–	0,11	4	5	2
	24	162 307	0,1	0,4	–	0,12	7	6	3
	36	161 686	0,8	0,3	–	0,00	4	4	3
	48	162 505	0,1	0,3	–	0,10	4	7	3
	60	161 295	0,6	0,3	–	0,00	3	3	2
	72	161 321	0,0	0,4	–	0,00	5	6	4
Среднее			0,0	0,7	–	0,04	5	5	3
Весна									
Хаб-5	12, 36, 60	71 224	-0,2	2,5	6,8	0,39	50	83	93
	24, 48, 72	71 104	-0,5	2,8	8,1	0,34	45	78	90
Среднее			-0,3	2,6	7,5	0,36	48	80	91
Δ^*	12, 36, 60	71 224	0,3	0,3	–	0,05	5	4	3
	24, 48, 72	71 104	0,3	0,4	–	0,05	5	6	3
Среднее			0,3	0,4	–	0,05	5	5	3
Лето									
Хаб-5	12, 36, 60	151 937	-0,2	1,7	3,8	0,47	71	94	97
	24, 48, 72	152 414	0,0	1,9	4,5	0,43	65	91	96
Среднее			-0,1	1,8	4,1	0,45	68	92	96
Δ^*	12, 36, 60	151 937	0,2	0,1	–	0,04	4	2	2
	24, 48, 72	152 414	0,1	0,2	–	0,04	6	2	3
Среднее			0,2	0,2	–	0,04	5	2	2
Осень									
Хаб-5	12, 36, 60	196 691	0,1	2,1	6,1	0,35	61	89	95
	24, 48, 72	193 858	-0,1	2,4	7,3	0,33	54	84	91
Среднее			0,0	2,2	6,7	0,34	58	86	93
Δ^*	12, 36, 60	196 691	0,6	0,4	–	0,03	2	2	1
	24, 48, 72	193 858	0,2	0,3	–	0,02	3	2	1
Среднее			0,4	0,4	–	0,02	2	2	1
Зима									
Хаб-5	12, 36, 60	69 249	-0,6	2,4	5,6	0,47	52	82	93
	24, 48, 72	68 757	-1,2	2,9	6,7	0,42	43	75	88
Среднее			-0,9	2,7	6,1	0,45	48	79	91
Δ^*	12, 36, 60	69 249	0,5	0,6	–	0,09	6	6	6
	24, 48, 72	68 757	0,7	0,7	–	0,11	6	9	7
Среднее			0,6	0,6	–	0,10	6	8	6

В целом за период испытаний оценки качества приземного давления по «Хаб-5» существенно выше, чем по контрольной системе ЧПП «Хаб-15». Обеспеченность прогнозами с абсолютной ошибкой до 1 гПа составляет на первые сутки 43–44 % и превышает обеспеченность по «Хаб-15» на 4–7 %, соответственно уменьшились и относительная ошибка на 0,11–0,12 и абсолютная – на 0,7 гПа, при этом систематическая ошибка составила менее 0,5 гПа.

На вторые и третьи сутки обеспеченность прогноза приземного давления по всем градациям возрастает на 2–7 % в сравнении с контрольным. Для заблаговременности 72 часа относительная ошибка не улучшилась, но абсолютная ошибка снизилась на 0,4 гПа. В оценках качества прогноза приземного давления прослеживается суточный ход, и лучшие результаты получены в ночное время. Важно отметить устойчивость обеспеченности и абсолютной ошибки прогноза приземного давления: в среднем за одни прогностические сутки обеспеченность падает на 3 %, а абсолютная ошибка возрастает всего на 0,2 гПа, при этом относительная ошибка существенно снижается (иногда на 30 % и более) на вторые и третьи сутки прогноза.

Детализация оценок по сезонам года показывает наилучшие оценки для теплого периода года. Наибольшая обеспеченность с ошибкой 1 и 3 гПа достигается осенью и летом (соответственно 58–68 % и 86–92 %). Зимой и весной она падает до 48 % и 79–80 %. Для всех сезонов года характерно резкое возрастание обеспеченности при переходе от интервала в 1 гПа к интервалу 3 гПа, что обусловлено абсолютной ошибкой, которая летом составляет 1,8 гПа, а осенью – весной находится в пределах 2,2–2,7 гПа. Важно отметить, что наибольший прирост качества прогноза P_s в сравнении с контрольным отмечается зимой и весной (т. е. в области наиболее низких значений оценок).

Заметим, что приземное давление зависит как от высоты столба воздуха, так и от плотности воздушной массы (ВМ), которая в свою очередь зависит от влагосодержания, при этом температура определяет максимально возможное количество влаги в ВМ. На большей части территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России продолжительность холодного периода года существенно больше, чем продолжительность теплого периода. В холодный период года влагосодержание ВМ низкое и качество прогноза P_s существенно реагирует на уменьшение разности высот между ближайшим узлом сетки модели и высотой пункта прогноза при переходе к меньшему шагу сетки по горизонтали. В теплый период года приземное давление заметно реагирует на влагосодержание ВМ, поэтому различия в прогнозах по «Хаб-5» и «Хаб-15» меньше, чем для холодного периода года, и повышение качества прогнозов за счет уменьшения разности высот между ближайшим узлом сетки модели и высотой пункта прогноза менее выражено.

Существенное повышение качества прогнозов приземного давления особенно важно для метеорологического обслуживания авиации, т. к. по модельным значениям P_s рассчитываются поля приземного давления, приведенного к уровню моря по стандартной атмосфере (QNH), используемые в аэронавигации для указания

минимально допустимой высоты полета над текущим районом и определения высоты воздушного судна в окрестности аэродрома при посадке.

Оценки качества прогноза приземного ветра

Ниже в таблицах 2 и 3 представлены оценки качества прогнозов приземного ветра ($V_{10м}$) для системы ЧПП «Хаб-5» осредненные за весь период испытаний и посезонно.

В таблице 2 представлены данные в целом по выборке и с делением выборки на градации в соответствии с требованиями [11], из которых видно, что оправдываемость прогнозов скорости ветра достаточно высокая: от 93 % для заблаговременности 12 часов до 87 % для заблаговременности 72 часа. При этом для нужд авиации (наиболее требовательной к этому параметру отрасли деятельности) необходима оправдываемость прогнозов скорости ветра не менее 80 %, а данные по сравнению прогнозов системы «Хаб-5» с качеством прогнозов «Хаб-15» показывает отрицательный результат по всем характеристикам. Исключение составляют прогнозы ветра в градации $V_{10м} \geq 15$ м/с, где изменение числовых характеристик качества прогнозов имеет положительные значения. Здесь особенно важен тот факт, что средняя ошибка прогноза направления ветра существенно ниже, чем по общей выборке. Однако повторяемость этой градации в общей выборке крайне мала и составляет 0,03 % и преимущество системы «Хаб-5» в прогнозе ветра высоких скоростей над «Хаб-15» не проявляется в общем результате. Поэтому авторами

Таблица 2. Оценки качества прогноза приземного ветра в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока России

	Заблаговременность, ч	Вся выборка							$V_{10м} < 15$ м/с				$V_{10м} \geq 15$ м/с			
		N	$\bar{\delta}_{V^*}$ м/с	$\bar{\sigma}_{V^*}$ м/с	δ_{V^*} м/с	$\hat{\delta}_{V^*}$ м/с	δ_{dd^*} °	P_{HV^*} %	% от N	δ_{V^*} м/с	$\hat{\delta}_{V^*}$ м/с	δ_{dd^*} °	% от N	δ_{V^*} м/с	$\hat{\delta}_{V^*}$ м/с	δ_{dd^*} °
июнь 2022 г. – декабрь 2023 г., 284 пункта наблюдений																
Хаб-5	12	102 874	2,8	3,4	1,7	1,0	29	93	99,7	1,7	1,0	29	0,03	5,6	-4,6	21
	24	174 212	3,2	4,0	2,1	1,4	33	91	99,7	2,1	1,4	33	0,03	5,0	-3,8	22
	36	106 925	3,1	3,8	1,9	1,2	34	91	99,7	1,9	1,2	34	0,03	5,5	-4,4	23
	48	180 283	3,5	4,3	2,2	1,5	38	88	99,7	2,2	1,6	37	0,03	5,7	-4,5	26
	60	107 777	3,3	4,1	2,1	1,3	39	90	99,7	2,0	1,3	39	0,03	6,2	-5,3	27
	72	178 831	3,7	4,5	2,4	1,6	42	87	99,7	2,3	1,6	42	0,03	6,1	-4,9	31
Среднее			3,3	4,1	2,1	1,4	36	89	99,7	2,1	1,4	36	0,03	5,7	-4,5	26
Δ^*	12	102 874	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-4	-1	99,7	-0,2	-0,2	-4	0,03	0,6	1,2	1
	24	174 212	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4	-3	-2	99,7	-0,5	-0,4	-3	0,03	0,9	1,5	0
	36	106 925	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-4	-2	99,7	-0,2	-0,2	-4	0,03	0,8	1,9	1
	48	180 283	-0,3	-0,5	-0,5	-0,3	-3	-3	99,7	-0,5	-0,3	-3	0,03	0,9	1,6	1
	60	107 777	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-5	-2	99,7	-0,2	-0,2	-5	0,03	1,0	1,9	5
	72	178 831	-0,3	-0,4	-0,4	-0,2	-4	-3	99,7	-0,4	-0,2	-4	0,03	1,0	2,2	3
Среднее			-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	-4	-2	99,7	-0,3	-0,2	-4	0,03	0,9	1,7	2

Таблица 3. Оценки качества прогноза приземного ветра в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока России

		Вся выборка										$0 \leq V_{\text{обн}} < 5 \text{ м/с}$				$5 \leq V_{\text{обн}} < 10 \text{ м/с}$				$V_{\text{обн}} > 10 \text{ м/с}$			
		$\bar{\delta}_{V_p}$ м/с	δ_{V_p} м/с	δ_{dd^p} °	$P_{\text{дт}^p}$ %	% от N	δ_{V_p} м/с	δ_{dd^p} °	% от N	δ_{V_p} м/с	δ_{dd^p} °	% от N	δ_{V_p} м/с	δ_{dd^p} °	% от N	δ_{V_p} м/с	δ_{dd^p} °	% от N	δ_{V_p} м/с	δ_{dd^p} °	% от N		
июнь 2022 г. – декабрь 2023 г., 284 пункта наблюдений																							
Хаб-5		2,8	3,4	1,7	1,0	29	93	86	1,7	1,2	22	13	2,0	0,2	21	1	2,2	-1,0	17				
		3,2	4,0	2,1	1,4	33	91	85	2,0	1,6	26	13	2,3	0,7	23	2	2,4	-0,6	18				
		3,1	3,8	1,9	1,2	34	91	86	1,9	1,4	27	13	2,2	0,3	24	1	2,4	-1,1	19				
		3,5	4,3	2,2	1,5	38	88	85	2,2	1,8	30	13	2,5	0,6	27	2	2,7	-1,0	22				
		3,3	4,1	2,1	1,3	39	90	86	2,0	1,5	32	13	2,3	0,1	29	1	2,6	-1,4	23				
		3,7	4,5	2,4	1,6	42	87	85	2,3	1,9	35	13	2,6	0,4	32	2	2,6	-1,4	27				
Среднее		3,3	4,1	2,1	1,4	36	89	86	2,0	1,6	29	13	2,3	0,4	26	2	2,5	-1,1	21				
Δ*		-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-4	-1	-	-0,3	-0,5	2	-	0,0	0,6	3	-	1,1	0,6	2				
		-0,3	-0,5	-0,5	-0,4	-3	-2	-	-0,4	-1,0	1	-	0,2	0,2	3	-	1,3	0,4	2				
		-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-4	-2	-	-0,3	-0,4	2	-	0,1	0,4	3	-	1,2	0,5	2				
		-0,3	-0,5	-0,5	-0,3	-3	-3	-	-0,5	-1,0	2	-	0,2	0,1	3	-	1,3	0,4	3				
		-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-5	-2	-	-0,3	-0,4	2	-	0,0	0,7	4	-	1,3	0,6	3				
		-0,3	-0,4	-0,4	-0,2	-4	-3	-	-0,5	-0,9	1	-	0,2	0,3	6	-	1,2	0,4	2				
Среднее		-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	-4	-2	-	-0,4	-0,7	2	-	0,1	0,4	4	-	1,2	0,5	2				
Весна																							
Хаб-5	12, 36, 60	3,6	4,2	2,2	1,4	35	87	81	2,2	1,7	28	17	2,3	0,5	25	2	2,2	-1,5	12				
	24, 48, 72	4,0	4,8	2,6	1,8	40	82	81	2,5	2,1	32	17	2,7	1,1	28	2	2,8	-1,4	15				
Среднее		3,9	4,6	2,4	1,7	38	84	81	2,4	1,9	30	17	2,6	0,9	26	2	2,5	-1,4	14				

Δ*	12, 36, 60	48 682	-0,3	-0,3	-0,3	-0,6	-4	-2	-	-0,4	-0,5	2	-	0,2	0,0	4	-	0,2	0,6	0	
	24, 48, 72	75 354	-0,5	-0,6	-0,5	-0,8	-3	-2	-	-0,5	-0,8	1	-	0,5	0,6	3	-	0,1	1,1	1	
Среднее			-0,4	-0,4	-0,4	-0,7	-4	-2	-	-0,4	-0,6	2	-	0,4	0,3	4	-	0,2	0,8	0	
Лето																					
Хаб-5	12, 36, 60	92 613	2,8	3,4	1,7	0,9	34	95	89	1,6	1,1	29	10	1,8	-0,5	25	1	1,7	-1,5	10	
	24, 48, 72	165 821	3,2	3,8	1,9	1,2	38	93	88	1,9	1,4	32	10	1,9	-0,2	27	2	2,7	-2,3	16	
Среднее			3,0	3,6	1,8	1,1	36	94	88	1,8	1,2	30	10	1,8	-0,4	26	2	2,2	-2,0	13	
Δ*	12, 36, 60	92 613	-0,2	-0,3	-0,2	-0,6	-4	-1	-	-0,3	-0,5	1	-	0,5	1,0	4	-	0,4	0,6	0	
	24, 48, 72	165 821	-0,2	-0,7	-0,3	-0,4	-2	-2	-	-0,4	-0,6	0	-	0,3	1,2	3	-	0,7	0,9	1	
Среднее			-0,2	-0,5	-0,3	-0,5	-3	-2	-	-0,4	-0,6	0	-	0,4	1,1	4	-	0,5	0,7	0	
Осень																					
Хаб-5	12, 36, 60	144 845	3,1	3,7	1,9	1,2	33	91	84	1,9	1,4	26	13	2,2	0,2	24	3	1,9	-1,1	12	
	24, 48, 72	216 022	3,5	4,3	2,3	1,6	36	87	85	2,2	1,8	29	13	2,5	0,7	26	2	2,4	-1,2	16	
Среднее			3,3	4,1	2,1	1,5	35	89	84	2,1	1,7	28	13	2,4	0,5	25	2	2,2	-1,2	14	
Δ*	12, 36, 60	144 845	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	-5	-2	-	-0,2	-0,3	2	-	0,1	0,4	4	-	0,4	0,7	1	
	24, 48, 72	216 022	-0,2	-0,4	-0,4	-0,6	-5	-4	-	-0,3	-0,4	2	-	0,4	0,3	3	-	0,3	0,6	2	
Среднее			-0,2	-0,2	-0,2	-0,4	-5	-3	-	-0,3	-0,4	2	-	0,3	0,3	3	-	0,3	0,6	1	
Зима																					
Хаб-5	12, 36, 60	31 436	3,3	4,2	2,2	1,5	38	89	86	2,0	1,7	30	12	2,7	0,6	28	2	1,4	-0,6	8	
	24, 48, 72	76 129	3,6	4,6	2,4	1,7	40	86	85	2,3	2,0	31	12	3,0	1,0	28	3	2,4	-0,7	10	
Среднее			3,5	4,5	2,4	1,6	39	87	85	2,2	1,9	31	12	2,9	0,9	28	2	1,7	-0,6	9	
Δ*	12, 36, 60	31 436	-0,1	-0,2	-0,2	-0,4	-5	-2	-	-0,2	-0,3	2	-	0,2	0,1	2	-	0,1	0,5	2	
	24, 48, 72	76 129	-0,2	-0,3	-0,2	-0,5	-4	-3	-	-0,3	-0,4	1	-	0,4	0,7	3	-	1,1	1,5	4	
Среднее			-0,2	-0,2	-0,2	-0,4	-4	-2	-	-0,2	-0,4	2	-	0,3	0,5	2	-	0,6	1,0	3	

был выполнен расчет оценок по градациям, важным для авиационных прогнозов. Результаты приведены в таблице 3, данные которой показывают, что повышение качества прогнозов скорости и направления приземного ветра по системе «Хаб-5» наблюдается для выборки со скоростью ветра не менее 5 м/с, а частота таких случаев хоть и существенно выше, чем выборки от 15 м/с, но все еще невелика: 14–15 % от общей выборки. Тем не менее, существенно выражено убывание средней ошибки прогноза направления ветра с ростом градации скорости и для выборки от 10 м/с и более, погрешность прогноза для заблаговременностей 12, 24 и 36 часов составляет менее 20 °С, что укладывается в требования для авиационных прогнозов.

Следует отметить, что для пунктов прогноза, расположенных в континентальной части рассматриваемой территории, повторяемость скорости ветра не более 3 м/с составляет от 56 % до 75 %, а для прибрежных пунктов – от 10 %–12 % весной до 56 %–65 % летом (см., например, в [6] распределение сезонных выборок скорости ветра по градациям на аэродромах Камчатки). Направление для таких скоростей ветра не оценивается.

Учитывая, что внутриконтинентальных пунктов прогноза в испытываемой выборке существенно больше, чем прибрежных, нетрудно понять, что основная ошибка прогнозов относится к градации слабого ветра, т. е. модель с горизонтальным шагом 5 км хуже прогнозирует штиль и очень слабый ветер, завышая величину скорости ветра в этой градации в среднем на 2 м/с.

Детализация оценок по сезонам года показывает увеличение повторяемости ветра со скоростями от 5 м/с и выше до 19 % весной и уменьшение до 11 % – 12 % летом. При этом наиболее высокая оправдываемость прогнозов скорости ветра получена для лета (93 %–95 %), а наиболее низкая весной (82 %–87 %), что в любом случае укладывается в требования Федеральных авиационных правил для прогноза скорости ветра на аэродромах. Тем не менее, ошибки прогноза направления ветра все еще велики для нужд авиации, хотя и не превышают пределов румба и вполне удовлетворительны для прогнозов общего пользования.

Оценки качества прогноза приземной температуры воздуха

В табл. 4 представлены осредненные оценки качества прогноза температуры воздуха у земли ($T_{2м}$) для системы ЧПП «Хаб-5» за весь рассматриваемый период и посезонно. Обозначения, использованные в таблице 4, соответствуют описанию, приведенному к таблице 1, а $P_{И}$ – оправдываемость инерционного прогноза.

Оправдываемость прогноза $T_{2м}$ по «Хаб-5» в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока России осредненная по всем заблаговременностям за весь период сравнения составила 69 %, а преимущество над «Хаб-15» не превысило 2 %, при этом абсолютная и систематическая ошибки прогноза уменьшились в среднем соответственно на 0,2 °С и 0,4 °С. Оправдываемость прогноза $T_{2м}$ на первые сутки в среднем за период испытаний составляет более 70 % и снижается с заблаговременностью до 68–64 % в течение вторых и третьих суток. Преимущество прогнозов «Хаб-5» над инерционным прогнозом $T_{2м}$ существенно и в среднем за год

составляет около 13 %. Наиболее высокое значение оценок качества прогноза $T_{2м}$ зафиксировано для дневного периода. Абсолютная ошибка прогноза $T_{2м}$ в среднем находится в интервале значений от 2,5 °С до 3,1 °С, летом и осенью она уменьшается до 2,1 °С – 2,4 °С.

Представленные оценки показывают, что наибольший прирост качества прогнозов приземной температуры получен для дневного периода весной и зимой, несколько ниже – летом и практически отсутствует осенью. Здесь следует отметить, что существенное повышение качества прогнозов приземной температуры путем уменьшения горизонтального шага модельной сетки вряд ли возможно.

Это физически обусловлено тем, что значения приземной температуры формируются преимущественно в процессе взаимодействия нижних слоев атмосферы с подстилающей поверхностью и балансом длинноволновой и коротковолновой радиации. В этой связи необходимо учитывать, что файлы описания свойств подстилающей поверхности заполнены разработчиками модели (США). Они, вероятно, вполне адекватны территории США и, возможно, Западной Европы или южных районов Дальнего Востока. Для территории Восточной Сибири и Дальнего Востока РФ они заполнены схематично. Параметризации физических процессов разработаны для южных районов ДВ-региона (Япония, Южная Корея). Таким образом, для повышения качества прогнозов $T_{2м}$ необходимо адаптировать описание подстилающей поверхности и параметризации радиационных процессов к физико-географическим и климатическим условиям ДВ-региона РФ. Но, в связи с тем, что исходные данные для интегрирования модели берутся из прогнозов по материнской модели (gfs), имеющей те же особенности, ожидать, что модель за 1–2 суток интегрирования сможет адаптировать исходные приземные поля к особенностям подстилающей поверхности и радиационных процессов рассматриваемой территории не приходится. В этой связи повышение качества прогнозов приземной температуры представляется возможным только в пунктах наблюдений путем статистических процедур коррекции модельных прогнозов.

Оценки качества прогноза приземной точки росы

В табл. 5 представлены осредненные оценки качества прогнозов приземной точки росы ($Td_{2м}$) системы ЧПП «Хаб-5» за весь рассматриваемый период и сезонно.

В целом за год температура точки росы прогнозируется несколько лучше, чем приземная температура ($T_{2м}$): обеспеченность в одно-, трех- и пятиградусных интервалах составляет 40, 74 и 88 % соответственно.

У оценок качества прогноза $Td_{2м}$ отмечается суточный ход, абсолютная ошибка незначительно возрастает в ночное время, и наблюдается систематическая погрешность около –0,5 °С. Система «Хаб-5» показывает более высокие оценки качества прогноза $Td_{2м}$, чем «Хаб-15», но это преимущество невелико: обеспеченность возросла на 1 %–2 %, а относительная и систематическая погрешности изменились на 0,03 °С и 0,1 °С соответственно.

Таблица 4. Оценки качества прогноза температуры воздуха у поверхности земли в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока России

	Заблаговременность, ч	N	Статистические характеристики				P _{ит} , %	P, %			P _{ит} , %
			$\delta, ^\circ\text{C}$	$\delta, ^\circ\text{C}$	$\delta_\phi, ^\circ\text{C}$	ε		$\leq 1^\circ$	$\leq 3^\circ$	$\leq 5^\circ$	
июнь 2022 г. – декабрь 2023 г., 284 пункта наблюдений											
Хаб-5	12	166 120	-0,3	2,5	3,4	0,74	74	40	75	90	61
	24	162 307	0,2	2,7	3,0	0,90	70	38	71	87	68
	36	161 686	-0,4	2,7	4,3	0,63	71	37	72	88	51
	48	162 505	0,1	2,9	3,8	0,76	68	35	68	85	57
	60	161 295	-0,5	2,9	4,7	0,62	68	35	69	86	47
	72	161 321	-0,1	3,1	4,2	0,74	64	33	65	83	54
Среднее			-0,2	2,8	3,9	0,70	69	36	70	86	56
Δ^*	12	166 120	0,9	0,2	–	0,05	2	1	2	2	–
	24	162 307	-0,1	0,1		0,03	0	1	0	0	
	36	161 686	0,8	0,2		0,04	2	1	2	2	
	48	162 505	0,1	0,1		0,03	2	1	1	0	
	60	161 295	0,7	0,2		0,04	2	1	2	2	
	72	161 321	0,2	0,2		0,05	1	1	1	1	
Среднее			0,4	0,2		0,04	2	1	1	1	
Весна											
Хаб-5	12, 36, 60	71 224	-2,0	3,3	4,6	0,72	60	30	61	81	49
	24, 48, 72	71 104	-1,4	3,2	4,2	0,77	62	31	63	82	53
	Среднее			-1,7	3,2	4,4	0,74	61	30	62	82
Δ^*	12, 36, 60	71 224	0,6	0,4	–	0,09	4	2	4	5	–
	24, 48, 72	71 104	0,1	0,1		0,02	1	1	1	0	
	Среднее			0,3	0,2		0,05	2	2	2	2
Лето											
Хаб-5	12, 36, 60	151 937	0,1	2,0	3,5	0,56	84	47	84	96	59
	24, 48, 72	152 414	0,6	2,5	2,9	0,87	73	39	74	91	68
	Среднее			0,4	2,2	3,2	0,72	78	43	79	94
Δ^*	12, 36, 60	151 937	0,7	0,1	–	0,04	3	3	2	1	–
	24, 48, 72	152 414	0,3	0,1		0,04	1	2	2	1	
	Среднее			0,5	0,1			2	2	2	1
Осень											
Хаб-5	12, 36, 60	196 691	-0,1	2,5	4,0	0,63	74	39	75	91	53
	24, 48, 72	193 858	0,1	2,5	3,4	0,74	73	39	74	88	60
	Среднее			0,0	2,5	3,7	0,68	73	39	74	89
Δ^*	12, 36, 60	196 691	0,6	0,0	–	0,00	0	0	0	1	–
	24, 48, 72	193 858	0,0	0,2		0,04	1	1	1	0	
	Среднее			0,3	0,1		0,02	0	0	0	0
Зима											
Хаб-5	12, 36, 60	69 249	-0,9	4,4	5,2	0,87	47	21	48	69	41
	24, 48, 72	68 757	0,3	4,7	5,2	0,91	45	20	45	66	39
	Среднее			-0,3	4,6	5,2	0,89	46	20	46	68
Δ^*	12, 36, 60	69 249	1,1	0,4	–	0,08	4	1	4	4	–
	24, 48, 72	68 757	-0,3	0,1		0,01	0	0	0	0	
	Среднее			0,4	0,2		0,04	2	0	2	2

Примечание: обозначения как в табл. 1.

**Таблица 5. Оценки качества прогноза точки росы у поверхности земли
в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока России**

	Заблаговременность, ч	N	Статистические характеристики				P, %		
			$\delta, ^\circ\text{C}$	$\delta, ^\circ\text{C}$	$\delta_\phi, ^\circ\text{C}$	ε	$\leq 1 ^\circ\text{C}$	$\leq 3 ^\circ\text{C}$	$\leq 5 ^\circ\text{C}$
июнь 2022 г. – декабрь 2023 г., 284 пункта наблюдений									
Хаб-5	12	166 120	-0,4	2,4	2,6	0,92	43	78	91
	24	162 307	0,0	2,4	3,0	0,80	44	77	90
	36	161 686	-0,4	2,6	3,9	0,67	40	74	89
	48	162 505	-0,1	2,7	3,9	0,69	40	74	88
	60	161 295	-0,6	2,9	4,4	0,66	37	70	86
	72	161 321	-0,3	2,9	4,4	0,66	37	70	86
Среднее			-0,3	2,6	3,7	0,73	40	74	88
Δ^*	12	166 120	0,1	0,0	–	0,00	2	1	1
	24	162 307	0,3	0,1	–	0,03	2	1	0
	36	161 686	0,1	0,1	–	0,02	2	1	0
	48	162 505	0,2	0,1	–	0,03	1	2	1
	60	161 295	0,0	-0,1	–	0,00	1	1	1
	72	161 321	0,1	0,1	–	0,04	1	2	2
Среднее			0,1	0,0	–	0,03	2	1	1
Весна									
Хаб-5	12, 36, 60	71 224	0,2	2,9	4,3	0,69	37	69	86
	24, 48, 72	71 104	0,4	3,0	4,5	0,68	35	67	85
Среднее			0,3	2,9	4,4	0,69	36	68	86
Δ^*	12, 36, 60	71 224	0,2	0,0	–	0,01	1	0	0
	24, 48, 72	71 104	0,2	0,1	–	0,01	1	0	1
Среднее			0,2	0,0	–	0,01	1	0	0
Лето									
Хаб-5	12, 36, 60	151 937	-1,1	2,0	2,3	0,92	46	82	95
	24, 48, 72	152 414	-0,8	1,9	2,3	0,82	50	86	96
Среднее			-1,0	2,0	2,3	0,87	48	84	96
Δ^*	12, 36, 60	151 937	0,2	0,2	–	0,08	4	1	0
	24, 48, 72	152 414	0,3	0,1	–	0,04	2	2	1
Среднее			0,2	0,2	–	0,06	3	1	0
Осень									
Хаб-5	12, 36, 60	196 691	-0,3	2,5	3,8	0,67	42	76	90
	24, 48, 72	193 858	-0,1	2,4	4,0	0,60	41	75	89
Среднее			-0,2	2,4	3,9	0,64	42	76	90
Δ^*	12, 36, 60	196 691	0,2	0,0	–	0,02	1	1	0
	24, 48, 72	193 858	0,3	0,1	–	0,05	1	2	1
Среднее			0,2	0,0	–	0,03	1	2	0
Зима									
Хаб-5	12, 36, 60	69 249	0,0	4,1	5,3	0,80	24	53	73
	24, 48, 72	68 757	1,0	4,6	5,5	0,85	21	47	67
Среднее			0,5	4,4	5,4	0,82	23	50	70
Δ^*	12, 36, 60	69 249	0,4	0,1	–	0,00	1	1	1
	24, 48, 72	68 757	0,2	0,3	–	0,04	0	1	2
Среднее			0,3	0,2	–	0,02	0	1	2

Примечание: обозначения как в табл. 1.

Точка росы лучше всего прогнозируется в теплый период года, обеспеченность в одно- и трехградусном интервалах составляет 35–50 % и 67–86 % соответственно, при этом абсолютная ошибка находится в пределах 2–3 °С. Зимой оценки существенно ниже: обеспеченность в одно- и трехградусном интервалах падает до 23 и 50 % соответственно, абсолютная ошибка составляет около 4,5 °С. Сезонные оценки $Td_{2м}$ по «Хаб-5» также незначительно лучше, чем контрольные. Преимущество более выражено летом и осенью и практически отсутствует зимой и весной. Это отражает, в первую очередь, сезонные колебания качества прогноза температуры воздуха у земли (над теплой подстилающей поверхностью оно существенно выше, чем над холодной [7]), поскольку собственно температура точки росы в модели не фигурирует. По модели рассчитывается фактическое влагосодержание $ВМ$, по значениям которого вычисляется температура точки росы при текущем значении приземной температуры и давления по соотношениям типа формулы Магнуса [7].

Очевидно, ошибки в прогнозе температуры существенно влияют на качество прогноза точки росы. Вариации значений приземного давления по сравнению со средним (климатическим) давлением невелики и мало влияют на изменение значений $Td_{2м}$. Хотя какое-то влияние, безусловно, есть, и повышение качества прогнозов приземного давления по «Хаб-5» в сравнении с «Хаб-15» вносит свой положительный вклад в оценки $Td_{2м}$. В этой связи, для понимания наличия или отсутствия изменений в качестве прогноза приземной влажности при уменьшении пространственного разрешения модели, следует оценивать либо прогнозируемое влагосодержание $ВМ$ в сравнении с фактическим, рассчитанным по данным наблюдений за температурой точки росы, приземной температурой и приземным давлением, либо прогностическую точку росы рассчитывать по модельному влагосодержанию и наблюдаемым значениям $T_{2м}$ и P_s . Однако такой подход не предусмотрен Методическими указаниями [11].

Оценки качества прогноза полусуточных сумм осадков

В табл. 6 представлены осредненные оценки качества прогнозов полусуточных сумм осадков ($O_{s_{12}}$) для систем ЧПП «Хаб-5» и их сравнение с «Хаб-15» за рассматриваемый период. В таблице 6 используются следующие обозначения: U , Π и FAR – оправдываемость, предупрежденность и ложная предупрежденность в классе явления соответственно, P_{Hos} – оправдываемость по наставлению [12], δ_{Os} и $\hat{\delta}_{Os}$ – абсолютная и систематическая ошибки количества осадков, B – отношение количества модельных явлений в классе осадков к факту, T и H – критерии Пирси–Обухова и Хейдке–Багрова соответственно.

Наибольший рост новая система показывает по следующим характеристикам: оправдываемость в классе осадков на 7–11 % и предупрежденность в классе без осадков на 8–10 %, а также нелинейные критерии Пирси–Обухова и Хейдке–Багрова возросли на 0,01–0,08 и 0,03–0,09 соответственно (в особенности на вторые и третьи сутки прогноза).

Анализ значений систематической и абсолютной ошибок совместно с отношением количества модельных явлений в классе осадков к факту указывает на то,

**Таблица 6. Оценки качества прогноза приземного ветра
в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока России**

	Заблаговременность, ч	Класс явления	Оправ- дыва- емость, U, %	Предуп- режден- ность, П, %	U + П, %	FAR, %	P_{nos} , %	δ_{Os} , мм	δ_{Os^*} , мм	B	T	H
Хаб-5	12	Осадки	68	67	135	32	92	1,2	-0,8	1,0	0,60	0,52
		Без осад.	91	91	182	10						
	24	Осадки	64	81	145	37	90	1,1	-0,5	1,2	0,64	0,59
		Без осад.	92	83	175	9						
	36	Осадки	59	82	141	42	88	1,1	-0,4	1,3	0,64	0,60
		Без осад.	93	82	175	8						
48	Осадки	55	79	134	43	87	1,1	-0,3	1,3	0,59	0,51	
	Без осад.	93	80	173	8							
60	Осадки	52	78	130	49	86	1,1	-0,2	1,4	0,55	0,47	
	Без осад.	92	79	171	9							
72	Осадки	50	75	125	50	84	1,2	-0,2	1,4	0,50	0,44	
	Без осад.	90	76	166	10							
Среднее, N = 898519			58	77	135	42	88	1,1	-0,4	1,3	0,58	0,52
			92	82	174	9						
Δ^*	12	Осадки	11	-5	6	9	0	0,0	-0,2	0,2	0,01	0,03
		Без осад.	-3	10	7	0						
	24	Осадки	10	-3	7	9	1	-0,0	-0,2	0,3	0,05	0,08
		Без осад.	1	9	8	0						
	36	Осадки	9	-2	7	8	1	-0,1	-0,3	0,3	0,07	0,09
		Без осад.	1	9	10	1						
48	Осадки	8	-2	6	8	1	0,0	-0,1	0,3	0,06	0,07	
	Без осад.	0	9	9	0							
60	Осадки	7	-3	4	7	1	-0,1	-0,2	0,3	0,07	0,09	
	Без осад.	1	8	9	1							
72	Осадки	7	-2	5	7	1	-0,1	-0,1	0,3	0,08	0,09	
	Без осад.	0	8	8	0							
Среднее, N = 898519			8	-3	5	8	1	0,0	-0,2	0,3	0,06	0,07
			0	8	8	0						

что «Хаб-5» в среднем производит больше осадков, чем «Хаб-15», что повлияло на изменение соотношений между значениями оправдываемости и предупрежденности в классах осадков и без осадков в сравнении с «Хаб-15». Однако, исходя из существенного роста критериев Пирси–Обухова (Т) и Хейдке–Багрова (Н), можно сделать вывод о том, что «Хаб-5» позволяет получить более качественный прогноз в классе осадков при незначительном завышении их количества. Достаточно большие значения ложной предупрежденности в классе осадков являются следствием необходимости выбора порогового значения количества осадков, выше которого фиксируется модельное явление «осадки». В данном исследовании оно было установлено в 0,01 мм за 12 ч. и поэтому подавляющая часть

явлений, учтенных при расчете ложной предупрежденности, это очень слабые модельные осадки (модельная морось). Определенное влияние оказывает и соотношение площадей модельных ячеек, в «Хаб-15» оно составляет 225 км^2 , а в новой системе – всего 25 км^2 . Это одна из причин, по которой оправдываемость P_{Hos} практически не улучшилась. Вероятно, методически было бы более правильным сбалансировать границу отсечения модельных осадков на единицу площади. Но такой подход не предусмотрен Методическими указаниями [11].

Заключение

В рамках проекта 1.3 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. подготовлена и протестирована в рабочем режиме новая система краткосрочного численного прогноза погоды на основе модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 5 км и 51 уровнем по вертикали для РСМЦ Хабаровск. Для оценки качества прогнозов приземной температуры воздуха, давления, ветра и полусуточных сумм осадков в пунктах восточной Сибири и Дальнего Востока России в период с июня 2022 г. по декабрь 2023 г. рассчитывались все числовые характеристики качества прогнозов, предусмотренные Методическими указаниями по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов [13]. Выполнено сравнение качества экспериментальных прогнозов с прогнозами по оперативной модели ЧПП с горизонтальным шагом 15 км и 31 уровнем по вертикали по единому перечню пунктов, сроков старта (единым исходным данным) и заблаговременностей прогноза.

В целом получено преимущество новой системы ЧПП над оперативной по всем элементам погоды. Качество прогноза T_{2m} возросло на 2 % (до 64–74 %), Оценки качества прогноза точки росы также немного повысились в сравнении с контрольными, и наибольший прирост отмечен в теплый период года. Качество прогноза приземного давления возросло значительно: обеспеченность в интервале абсолютной ошибки до 1 гПа превысила контрольную на 4–7 %, относительная ошибка уменьшилась на 0,11–0,12, абсолютная – на 0,7 гПа (до 2,4 гПа). Наибольший прирост качества прогноза P_s в сравнении с контрольным отмечен в холодный период года, то есть в период наиболее низкого качества прогнозов по оперативной модели ЧПП. Возросло и качество прогнозов скорости и направления приземного ветра для скоростей не менее 5 м/с при некотором снижении оценок качества прогноза слабых ветров. Здесь особенно важно систематическое снижение ошибки прогноза направления ветра с ростом градации скорости. Качество прогнозов полусуточных сумм осадков по «Хаб-5» достаточно высокое.

В среднем оправдываемость по наставлению [15] достигает 88 %, значения критериев Пирси–Обухова и Хейдке–Багрова составляют 0,58 и 0,52 соответственно, сумма оправдываемости и предупрежденности в классах осадков и без осадков равна 135 и 174 % соответственно. Эти характеристики соответствуют требованиям к оперативным прогнозам общего пользования [15].

В статье проанализированы причины существенного роста качества прогнозов приземного давления и сравнительно небольшого повышения степени успешности

прогнозов приземной температуры и точки росы. Показан рост качества прогнозов приземного ветра для скоростей не менее 5 м/с (т. е. в градах, важных для жизнедеятельности населения) и отмечено соответствие качества прогнозов приземного давления, ветра и осадков требованиям «Наставления по краткосрочным прогнозам» [12].

К сожалению, достичь требуемого уровня качества для прогноза приземной температуры и точки росы в холодный период года не удалось. Причинами являются несоответствие описания свойств подстилающей поверхности и процессов радиационного баланса в модели WRF-ARW физико-географическим и климатическим условиям Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Отмечено, что при использовании исходных данных от материнской модели (прогнозов gfs) работы по адаптации указанных факторов к рассматриваемой территории нецелесообразны. Для повышения качества прогнозов приземной температуры и точки росы в пунктах до приемлемого уровня необходимо разрабатывать технологии физико-статистической коррекции модельных данных.

Исходя из вышеизложенного, авторы полагают, что новую систему ЧПП «Хаб-5» следует рекомендовать к эксплуатации в оперативном режиме.

Литература

1. Вербицкая Е.М. Система численного прогноза погоды регионального специализированного метеорологического центра в Хабаровске, перспективы развития и совершенствования // Труды ДВНИГМИ, 2021. – Вып. 176. – С. 57–72.
2. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Использование высокопроизводительной вычислительной техники для численного моделирования и прогнозирования опасных для авиации явлений погоды в дальневосточном регионе // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления. Материалы VI Международной научно-практической конференции. Хабаровск, 2021. – С. 40–45.
3. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Применение высокопроизводительных систем для численного прогноза погоды в Дальневосточном регионе России // Вестник Тихоокеанского государственного университета, 2015. – № 3. – С. 131–140.
4. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Результаты испытаний краткосрочных оперативных прогнозов мезомасштабной модели WRF-ARW «Хаб-15» в пунктах дальневосточного региона России // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов, 2016. – № 43. – С. 32–62.
5. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО. ВМО-№ 485. – Женева: ВМО, 2021. – 170 с.
6. Развитие моделей, методов и технологий региональных метеорологических, гидрологических и морских прогнозов (в том числе опасных явлений) в интересах повышения качества гидрометеорологического обеспечения УГМС региона Дальнего Востока. Научный руководитель Вербицкая Е.М. Шифр. темы 1.3. Владивосток, 2022. 174 с. Рег. № НИОКТР АААА-А20-120031990013-1. Рег. № ИКРБС 224012600431-5.
7. Развитие моделей, методов и технологий региональных метеорологических, гидрологических и морских прогнозов (в том числе опасных явлений) в интересах повышения качества гидрометеорологического обеспечения УГМС региона Дальнего Востока. Научный руководитель Вербицкая Е.М. Шифр. темы 1.3. Владивосток, 2023. 194 с. Рег. № НИОКТР АААА-А20-120031990013-1. Рег. № ИКРБС 224012600431-5.

8. Разработать технологии прогноза перемещения и эволюции тропических циклонов и сопутствующих опасных метеорологических явлений применительно к территории Дальнего Востока и прилегающих морей на базе моделей WRF. Отчет о НИР (заключ.): Научный руководитель Крохин В.В., исполнители Вербицкая Е.М., Гончуков Л.В., Романский С.О. Шифр темы 1.1.9.2. Владивосток, 2019. 190 с. Рег. № АААА-А17-117021310334-4. Рег. № ИКРБС АААА-Б20-220012490008-0.

9. Романский С. О., Вербицкая Е.М., Суляндзига П.Б. Результаты численного моделирования формирования и развития интенсивной конвекции, вызвавшей смерч в Благовещенске 31 июля 2011 г. // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 6. – С. 25–35.

10. Романский, С.О., Вербицкая Е.М. Сильные шквалистые ветры в Южно-Сахалинске летом 2014 г. // Геосферные исследования, 2023. – № 4. – С. 143–156.

11. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 150 с.

12. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – Москва: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019. – 72 с.

13. Skamarock W. C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G. et al. A description of the Advanced research WRF version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). 2008. 125 p. URL: <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:500>.

14. Romanskiy S., Verbitskaya E. New operational short- range numerical weather prediction system of Khabarovsk regional specialized meteorological center // 5th Int. Conf. on Information Technologies and High-Performance Computing; Khabarovsk, Russian Federation, 16–19 Sep 2019 // CEUR Workshop Proceedings. 2019. Vol. 2426. P. 77–82.

15. Verbitskaya, E., Romanskiy S., Verbitskaya Z. Numerical forecasting of squall lines and strong winds on the territory of Transbaikalia Region, Russia // CEUR Workshop Proceedings: 5th Int. Conf. on Information Technologies and High-Performance Computing; Khabarovsk, Russian Federation, 16–19 Sep 2019 // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2426. – P. 71–76.

ТЕНДЕНЦИИ В ХОДЕ ЭЛЕМЕНТОВ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Климат формируется под воздействием множества внешних и внутренних факторов, взаимодействующих и взаимно влияющих, дополняющих друг друга. Ни один из этих факторов не определяет полностью ход погодных условий в том или ином районе. Это в полной мере относится к территории Дальнего Востока, расположенного на границе огромного материка и столь же огромного океана, что обуславливает системное нарушение зональности в распределении основных гидрометеорологических характеристик. Тем интереснее исследовать элементы атмосферной циркуляции в этом районе, где изменения климата имеют место и достаточно исследованы, например, [8, 9, 11, 12].

В данной работе с помощью объективных критериев (индексов) исследованы некоторые элементы региональной атмосферной циркуляции. Регион исследования – Дальний Восток России и прилегающие акватории Тихого океана, что территориально близко к понятию второго естественного синоптического района (П е. с. р.).

Одним из индикаторов климатической системы является интенсивность центров действия атмосферы (ЦДА) и их положение. Смещение центров и вариации их интенсивности обуславливают характер воздушных течений и отражаются в изменениях климатического режима. В данной работе был выделен ряд региональных ЦДА, интенсивность которых исследована через усредненное атмосферное давление в районах их наиболее вероятного положения (среднего многолетнего положения).

Вторым важнейшим элементом атмосферной циркуляции над Дальним Востоком является муссон. Его активность также накладывает значительный отпечаток на погодные условия и климат всего региона. Этот элемент циркуляции исследован через индекс активности муссона.

Данные и методы обработки

Инструментом для количественной оценки состояния региональных центров действия атмосферы послужили усредненные стандартизированные значения атмосферного давления по выделенным районам. По значимости влияния на климат в регионе были выбраны следующие барические объекты (рис. 1). Для летних месяцев выбраны районы с координатами: 45–55° с. ш., 115–130° в. д. (летняя дальневосточная депрессия или амурская депрессия), 30–40° с. ш., 85–100° в. д. (азиатская депрессия), 45–55° с. ш., 140–160° в. д. (северный отрог тихоокеанского антициклона или охотский антициклон), 30–40° с. ш., 150–170° в. д. (западный отрог тихоокеанского антициклона). Для зимних месяцев: 45–55° с. ш., 115–130° в. д. (восточный отрог азиатского антициклона), 45–55° с. ш., 150–170° в. д. (циклоны

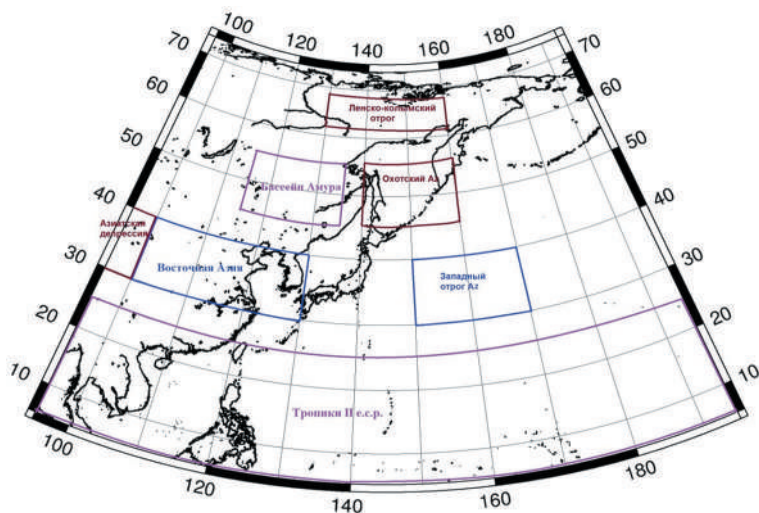


Рис. 1. Некоторые районы, выделенные для расчета индексов муссонной циркуляции и состояния региональных центров действия атмосферы

северо-западной части Тихого океана); 62–68° с. ш., 130–160° в. д. (ленско-колымский отрог).

Период исследований включает 1960–2023 гг. Для расчетов использованы средние месячные поля приземного атмосферного давления реанализа NCEP/NCAR. Нормы рассчитаны за период 1971–2020 гг.

Вторым индексом, характеризующим состояние атмосферной циркуляции в прибрежной зоне Дальнего Востока, выбран индекс активности муссона. Он рассчитан как нормированная разность атмосферного давления между выделенными смежными районами Азии и прилегающими акваториями дальневосточных морей и Тихого океана (подобный SOI – Southern Oscillation Index). Для расчетов использовались северная и южная пары смежных районов. В качестве северной барической пары для летних месяцев выбраны районы, обозначенные как «амурская депрессия» и «северный отрог тихоокеанского антициклона»; в качестве южной пары – районы «азиатская депрессия» и «западный отрог тихоокеанского антициклона». Индексы обозначены IM_n и IM_s соответственно для северной и южной барических пар. Северная пара позволяет оценить активность летнего дальневосточного муссона, южная – активность летнего муссона Юго-Восточной Азии. Активность зимнего муссона оценивалась по паре «восточный отрог азиатского антициклона» – «циклоны северо-западной части Тихого океана». Обозначение индекса прежние – IM_n . Для зимней фазы муссона положительные значения индекса указывают на его активное развитие, отрицательные – на деградацию. Для летнего муссона – наоборот, отрицательные значения индекса свидетельствуют об активности, положительные – об ослаблении.

Летняя муссонная циркуляция исследовалась за период с мая по август. Этот период включает две фазы развития летнего дальневосточного муссона [4, 10],

соответствующие первой (май-июнь) и второй (июль-август) половинам лета, в соответствии с синоптическим делением на сезоны. Зимняя муссонная циркуляция исследовалась для месяцев холодного периода с декабря по март.

Разработка и расчет индексов частично выполнены в рамках темы 1.3.6 НИОКТР Росгидромета 2019–2024 гг. Техника расчета индексов изложена в разделе «Направление работ», далее «Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень», далее «Терминология и сокращения» [2] на официальном сайте ФГБУ «ДВНИГМИ». Коэффициенты корреляции и спектральная плотность рассчитывались с использованием стандартных приложений Excel и пакета статистической обработки данных NumPy соответственно.

Обсуждение

Многолетний ход индексов летней муссонной циркуляции над Дальним Востоком и Восточной Азией для всех летних месяцев (для периода с мая по август) приведен на рис. 2. Ход индексов на графиках обработан линейной функцией и полиномом 5-й степени.

Анализ многолетнего хода индекса IM_n (напряжение между северной парой барических объектов) за летние месяцы показывает, что барическое напряжение между выбранными смежными районами суши и прилегающей части Тихого океана за исследуемый период, с 1960 по 2023 г., претерпело резкую смену знака активности на рубеже 1967–1968 гг. и менее выраженную – на рубеже 2012–2013 гг. До 1966 г. включительно летняя муссонная циркуляция над Дальним Востоком была крайне активна, в терминологии стандартных отклонений часто преодолевала два стандартных отклонения (σ). В дальнейшем более 40 лет наблюдался период деградации летней муссонной циркуляции, с редкими исключениями. Последнее десятилетие выбранного периода характеризуется активной фазой летней муссонной циркуляции над Дальним Востоком, но менее стабильной, с частыми сбоями, высокой изменчивостью по отношению к 60-м годам минувшего века (рис. 2а).

Более детальное рассмотрение активности дальневосточного муссона в отдельные летние месяцы (здесь графики не приводятся) показывает, что смена знака летней муссонной циркуляции конца 60-х годов для первой половины лета наступила на два года позже, чем это случилось с фазой муссона второй половины лета. Смена режима активности летнего муссона в текущем столетии наступила одновременно для первой и второй фаз летнего дальневосточного муссона.

Южная барическая пара, которая оценивалась через IM_s (рис. 2б), демонстрирует ещё более резкие переходы от фазы активности к деградации и вновь активности. Сроки смены фаз несколько асинхронны по отношению к северной барической паре. Муссонная циркуляция Юго-Восточной Азии была крайне активна до 1975 г. включительно, затем следовал период слабого развития муссона, с 2010 г. активность муссона вновь возросла.

Рассчитанные коэффициенты корреляции между IM_n и IM_s для первой и второй половины лета составляют 0,6, что указывает на значимую, но не абсолютную

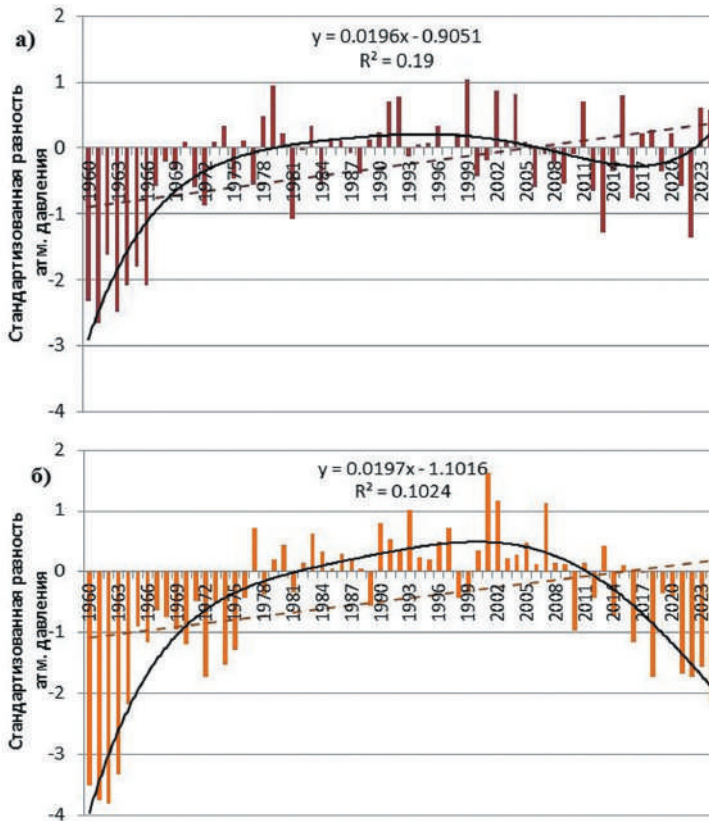


Рис. 2. Многолетний ход индексов летнего муссона IMn (а) и IMs (б) за период май-август, сглаженный линейной функцией (приведены уравнение и коэффициент детерминации) и полиномиальной функцией пятого порядка

связанность муссонных циркуляций над Дальним Востоком и Юго-Восточной Азией. Для того чтобы выяснить, какой барический объект из муссонной пары ответственен за активность муссонной циркуляции в большей мере, был проанализирован ход атмосферного давления в региональных ЦДА.

Амурская депрессия, многолетний ход атмосферного давления которой для первой и второй половин лета представлен на рис. 3, является доминирующим объектом системы летнего муссона над Дальним Востоком. Значимая деградация депрессии с 1973 по 2004 г. в первой половине лета и с 1974 по 2012 г. во второй половине лета определяла ослабление летней муссонной циркуляции в регионе. Именно в этот период были зафиксированы значимые уменьшения сумм летних осадков и уровней воды в реках Дальнего Востока [6, 7, 13].

Циклоническая деятельность в бассейне Амура стала активной в первой половине лета с 2005 г. и во второй половине лета с 2013 г. При этом амурская депрессия редко была одинаково активна в течение всего сезона. Исключением стал 2013 г., когда глубина депрессии была ниже нормы в течение всего сезона,

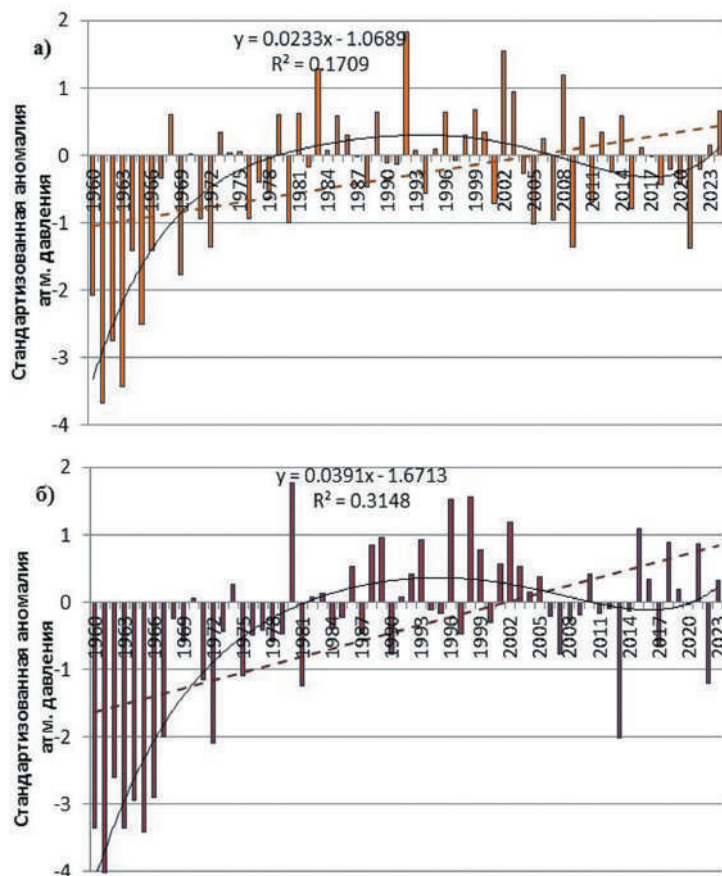


Рис. 3. Многолетний ход атмосферного давления в области амурской депрессии (район, ограниченный 45° и 55° с. ш., 115° и 130° в. д.) за период май-июнь (а) и июль-август (б); обозначения – как на рис. 2

а во второй половине лета составляла $-2,1\sigma$ относительно нормы (см. рис. 3б). В эти годы возросла повторяемость выхода глубоких циклонов, в том числе тропического происхождения, а вместе с ними – и повторяемость штормов и усиление летних осадков и наводнений [1, 3, 6]. Однако в дальнейшем, после 2013 г., летняя муссонная циркуляция редко была одинаково активна на протяжении всего теплого периода.

Вторым барическим объектом, определяющим летнюю муссонную циркуляцию над Дальним Востоком, является область высокого давления над Охотским морем и прилегающей частью Тихого океана. При месячном усреднении эта область высокого давления часто выглядит как отрог тихоокеанского антициклона, но охотский антициклон имеет самостоятельный механизм образования и входит в систему тихоокеанского антициклона на последней стадии своего развития. В нашей терминологии – это северный отрог тихоокеанского антициклона. Многолетний ход атмосферного давления в области отрога приведен на рис. 4.

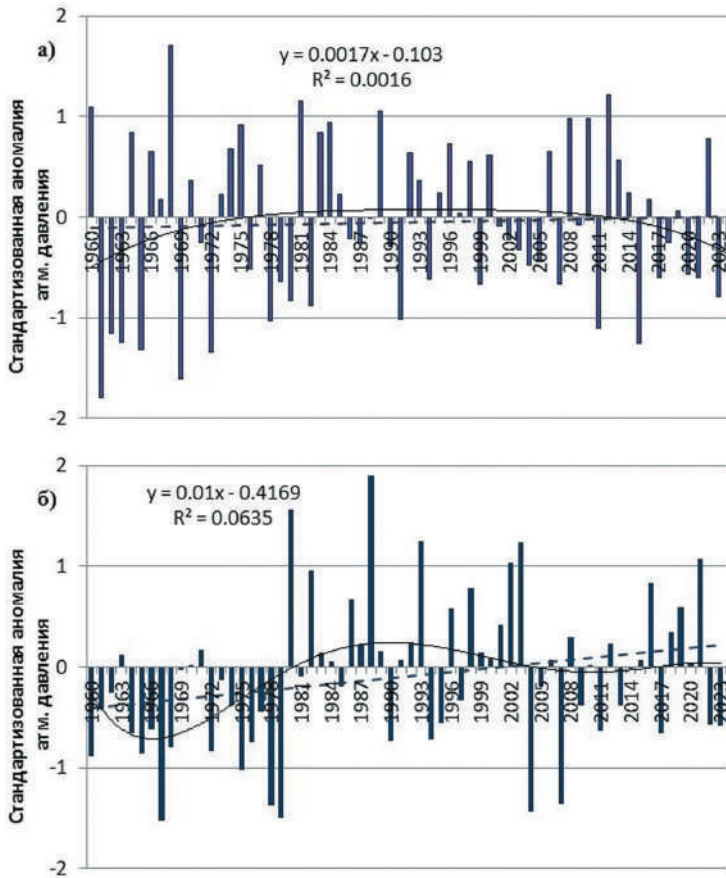


Рис. 4. Многолетний ход атмосферного давления в области северного отрога тихоокеанского антициклона (район, ограниченный 45° и 55° с. ш., 140° и 160° в. д.) за период май-июнь (а) и июль-август (б); обозначения – как на рис. 2

Атмосферное давление в районе, обозначенном как северный отрог антициклона, подчиняется изменчивости с частотой, превышающей и зачастую не совпадающей с частотой колебаний активности амурской депрессии. Спектральная плотность ряда максимальна на частотах 5 лет.

Доминирующим барическим объектом муссонной циркуляции над Юго-Восточной Азией летом является азиатская депрессия. Это безусловное доминирование справедливо для большей части периода исследования за исключением последнего десятилетия. Многолетний ход давления в области климатического положения азиатской депрессии для первой и второй половин лета представлен на рис. 5.

Очень активный циклогенез в области азиатской депрессии отмечался в течение 60-х годов прошлого столетия до 1976 г. включительно в первой половине лета и до 1975 г. включительно во второй половине лета. В дальнейшем вплоть до настоящего времени депрессия чаще бывала в заполненном состоянии (атмосферное давление в области депрессии систематически превышало норму,

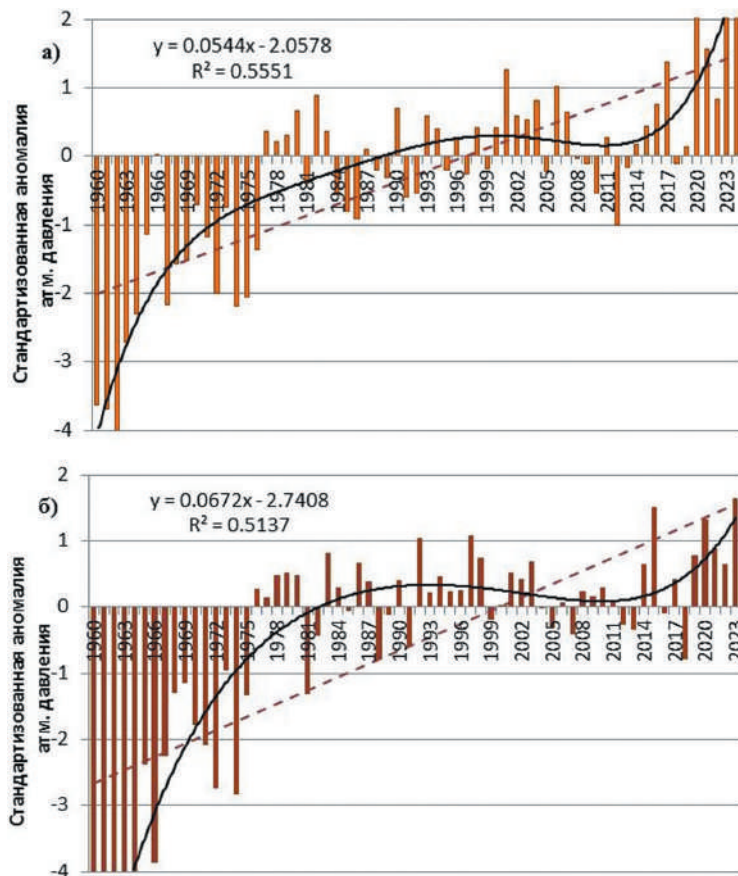


Рис. 5. Многолетний ход атмосферного давления в области азиатской депрессии (район, ограниченный 30° и 40° с. ш., 85° и 100° в. д.) за период май-июнь (а) и июль-август (б); обозначения – как на рис. 2

см. рис. 5). Последнее десятилетие депрессия была особенно слабой, причем в течение всего сезона, что работает против активности летнего азиатского муссона. Последний в этот период демонстрирует обострение вопреки деградации азиатской депрессии.

Западный отрог тихоокеанского антициклона, который часто распространяется до побережья Юго-Восточной Азии, так же, как и северный отрог в летний период, отличается высокочастотной изменчивостью. Его многолетний ход приведен на рис. 6. Максимальная спектральная плотность аномалий давления в области отрога – 7 лет.

Обострение летней муссонной циркуляции над Юго-Восточной Азией, определенное нами на рубеже 2010 г., обуславливалось именно усилением западного отрога тихоокеанского антициклона. В этот период атмосферное давление в области его климатического положения часто (в 10 случаях из 15) превышало норму (см. рис. 6).

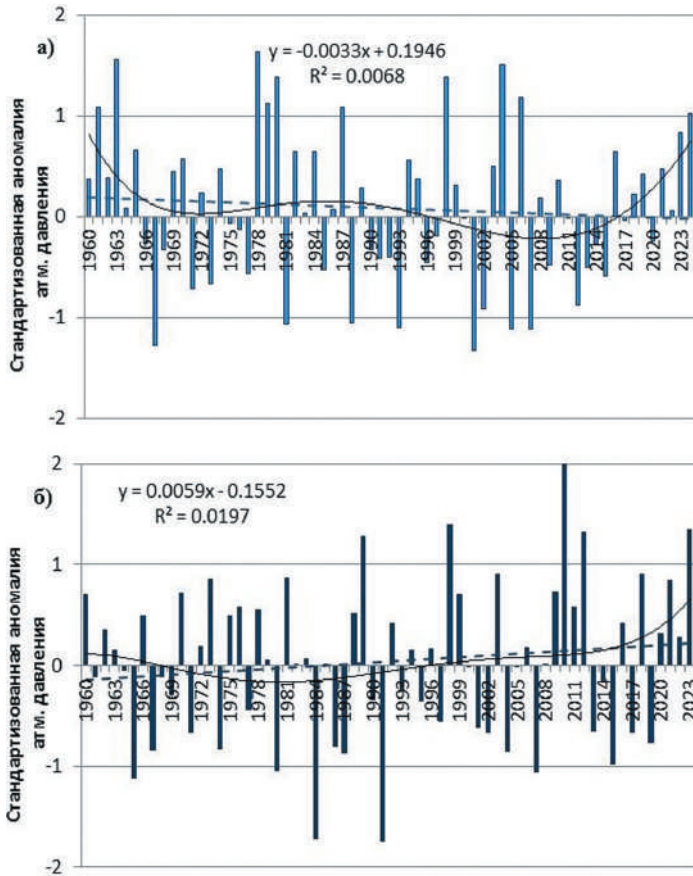


Рис. 6. Многолетний ход атмосферного давления в области западного отрога тихоокеанского антициклона (район, ограниченный 30° и 40° с. ш., 150° и 170° в. д.) за период май-июнь (а) и июль-август (б); обозначения – как на рис. 2

Графики хода индексов IM_n для зимних месяцев для демонстрации активности зимней муссонной циркуляции над Дальним Востоком представлены на рис. 7. Они обработаны аналогично летним индексам.

Зимой барическое напряжение в умеренных широтах над побережьем Дальнего Востока характеризуется яркой сменой режима на рубеже 1967–1968 гг., когда от обостренного состояния оно скачком перешло к слабому либо умеренному проявлению. Тенденция к относительно устойчивому обострению зимней муссонной циркуляции появилась лишь в 2003 г. (рис. 7а). При этом картина сильно размыва за счет относительно слабого муссона второй половины зимы (рис. 7б). С 2001 г. во второй половине зимы муссонная циркуляция зачастую бывала в деградированном состоянии. В 14 случаях из 24 индекс IM_n принимал отрицательные значения (зимний муссон слабый), в 10 случаях близок к норме и выше (зимний муссон активен).

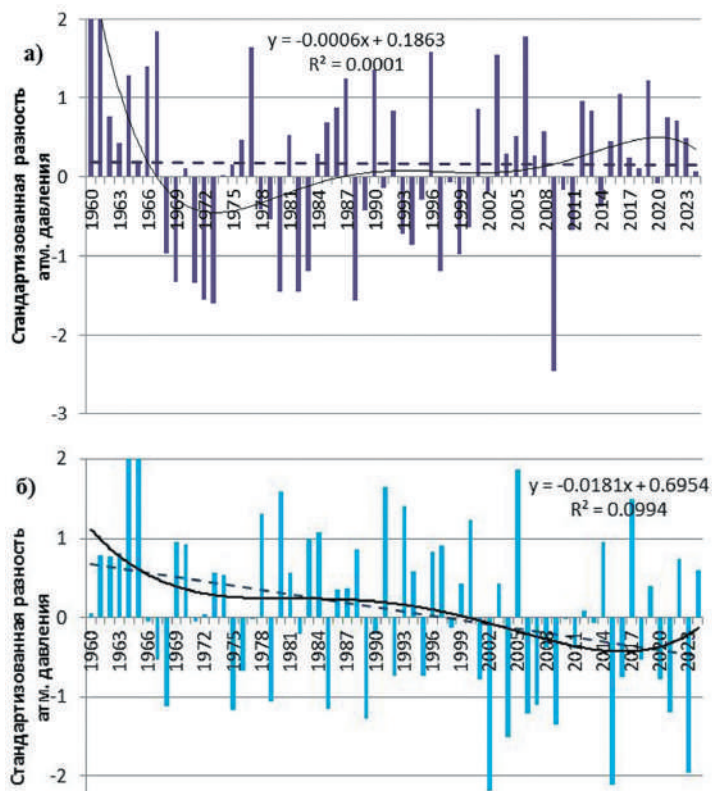


Рис. 7. Многолетний ход индекса ИП для зимних месяцев: в декабре-январе (а) и в феврале-марте (б); обозначения – как на рис. 2

Исследуя многолетний ход атмосферного давления на восточной периферии азиатского антициклона (рис. 8а) и в области активного зимнего циклогенеза над северо-западной частью Тихого океана (рис. 8б), можно видеть, что зимняя муссонная циркуляция над Дальним Востоком в большей мере определяется активностью азиатского антициклона. Коэффициент корреляции между индексом ИП и нормированным давлением на восточной периферии антициклона зимой достигает 0,8, в то время как связность с циклогенезом в северо-западной части Тихого океана – 0,4.

Интересным региональным барическим объектом зимой является ленско-колымский отрог. Его активность значительно влияет на зимние условия погоды многих районов Дальнего Востока. Так, зимние морозы в Приморском крае напрямую зависят от активности этого центра. Коэффициенты корреляции между усредненными температурами воздуха и усредненным давлением в области отрога достигают значений 0,4–0,6.

Прослеживая ход атмосферного давления в области отрога (см. рис. 9), можно выделить два продолжительных периода деградации и два периода активного состояния.

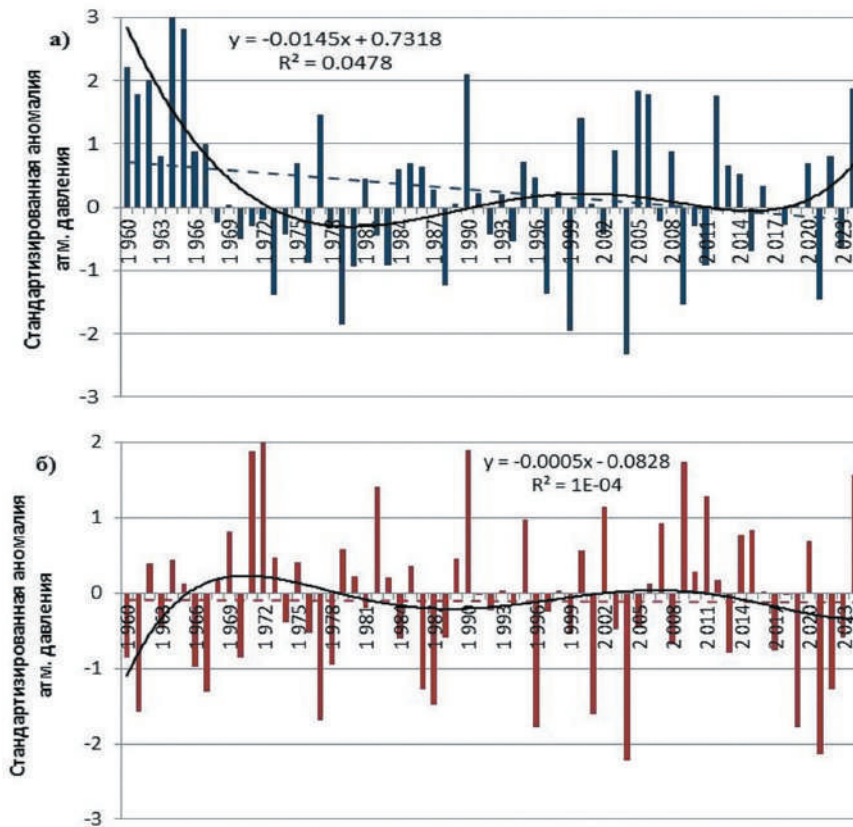


Рис. 8. Многолетний ход атмосферного давления в областях: а) – восточного отрога азиатского антициклона (район, ограниченный 45° и 55° с. ш., 115° и 130° в. д.) и б) – циклонов северо-западной части Тихого океана (район, ограниченный 45° и 55° с. ш., 150° и 170° в. д.) в декабре-феврале (календарная зима); обозначения – как на рис. 2

В 60-х – 70-х годах (до 1977 г. включительно, со сбоем в 1973 г.) имело место активное развитие отрога. Затем следовал период устойчивого ослабления и возврат к активному состоянию в 2005 г.

Ослабление нарушалось, в 2000 г. – значительно. Период активного состояния длился в течение 11 лет, с 2005 до 2015 г., с некоторыми сбоями в 2007–2008 гг. В настоящее время имеет место слабое развитие отрога. Следует добавить, что сезон зимы неоднороден по проявлению указанных тенденций.

Заключение

Состояние региональных ЦДА и активность муссонной циркуляции над Дальним Востоком и Юго-Восточной Азией подвержены высокой изменчивости. Индексы, их определяющие, могут превышать 2σ . Фаза активности элементов атмосферной циркуляции может меняться в виде скачка. Так, летняя муссонная циркуляция над Дальним Востоком претерпела резкие изменения режима

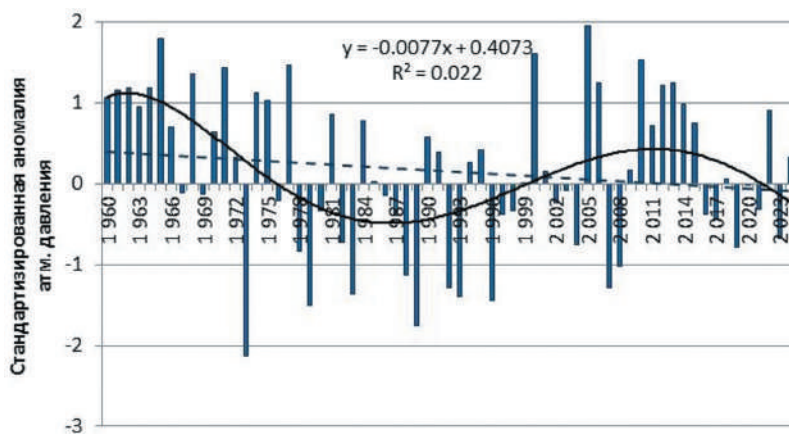


Рис. 9. Многолетний ход атмосферного давления в области ленско-колымского отрога в декабре-феврале (календарная зима); обозначения – как на рис. 2

на рубеже 1967–1968 гг. и 2012–2013 гг., от активной фазы к деградации и вновь к активности. В большинстве случаев активность муссонной циркуляции определялась обострением циклонической деятельности над Азией (азиатской и амурской депрессий). При этом для муссона Юго-Восточной Азии это справедливо лишь до 2013 г. С 2014 г. его активность обеспечивалась усилением тихоокеанского антициклона, точнее – его западным отрогом.

Индексы муссонной циркуляции уверенно демонстрируют наличие низкочастотной изменчивости. Это позволяет сделать предположение, что наступившая эпоха активности муссона может сохраняться на протяжении полутора-двух десятков лет.

Литература

1. Василевская Л. Н., Лисина И.А., Василевский Д.Н. Влияние макромасштабных атмосферных процессов на сезонный сток крупных сибирских рек // Метеорология и гидрология. – 2021, № 10. – С. 36–47.
2. Гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. – URL: <http://www.ferhri.org/paravleniya-rabot/proekty/2017-07-28-00-41-16.html> (дата обращения 15.08.2024).
3. Лисина И.А., Василевская Л.Н., Василевский Д.Н., Подвербная Е.Н., Агеева С.В. Анализ гидрологического режима и связей летне-осеннего стока нижнего Амура с циркуляционными индексами // Географический вестник=Geographical Bulletin. – 2020 (3). – С. 98–112. извлечено <https://press.psu.ru/index.php/geogr/article/view/3734>.
4. Лисогурский Н.И. Распространение муссона над Восточной Азией и степень его устойчивости // Метеорология и гидрология. – 1980. – № 5. – С. 54–59.
5. Мезенцева Л.И., Соколов О.В., Друзь Н.И. Атмосферная циркуляция над Дальним Востоком в 2013 г. при экстремальном наводнении в бассейне Амура // Известия ТИНРО. – 2015. – Том 180. – С. 261–272.
6. Мезенцева Л.И., Евдокимова Л.И., Вражкин А.Н. Повторяемость опасных явлений на акватории дальневосточных морей, вызванных выходом тропических циклонов // Метеорология и гидрология. – 2019, № 12. – С. 70–79.

7. Мещенина Л. А, Новороцкий П.В., Пономарев В.И. Климатические изменения и колебания стока Амура // Вестник ДВО РАН. – 2007. – № 4. – С. 44–54.
8. Пономарев В.И., Каплуненко Д.Д. Крохин В.В. Тенденции изменений климата во второй половине XX века в Северо-Восточной Азии, на Аляске и северо-западе Тихого океана // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 2. – С. 15–26.
9. Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Рудых Н.И., Воронцов А.А. Климатические изменения термических условий окраинных морей западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 3. – С. 44–57.
10. Сорочан О.Г. Некоторые особенности муссонной циркуляции Восточной Азии // Тр. ГГО – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – Вып. 70. – С. 92–108.
11. Сточкоте Ю.В., Василевская Л.Н. Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России // Географический Вестник Пермского государственного национального исследовательского университета. – 2016. – № 2, Том 37. – С. 84–96.
12. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме // СПб.: Наукоемкие технологии. – 2022. – 124 с.
13. Yihui Ding et al. Weakening of the Asian Summer Monsoon and Its Impact on the Precipitation Pattern in China // International Journal of Water Resources Development. – 2010. – Vol. 26, I. 3. – P. 423–439.

*Л. И. Мезенцева, Н.В. Глубоков,
В.А. Кантюг, Н.Г. Котович,
Т.А. Перунова, А.Н. Бугаец, С.Ю. Лупаков,
ФГБУ «ДВНИГМИ», г. Владивосток*

СИНОПТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ПРИМОРСКОГО КРАЯ В АВГУСТЕ 2023 г.

Введение

В августе 2023 г. на территории Приморского края отмечалось беспрецедентное количество осадков. Их сумма значительно превышала исторические максимумы. Во Владивостоке, Посъете, Тимирязевском, Астраханке, Роцино и ряде других населенных пунктов месячные суммы осадков стали рекордными за весь период инструментальных наблюдений.

Следует заметить, что частота и интенсивность опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ) на территории Приморского края в последнее десятилетие, а точнее на рубеже 2012 г., претерпели сдвиг от умеренности проявлений к высокой их частоте и интенсивности. Нарастание экстремальности климата на территории Приморского края вполне вписывается в современные изменения в целом климатической системы Земли [1–4]. Существует множество критериев для оценки экстремальности климата [2–5], но в рамках данной работы ограничимся лишь перечнем некоторых ОЯ, регулярно наблюдающихся на территории Приморского края и в прилегающих районах и акваториях. Большая часть зарегистрированных ОЯ этого периода относится к режиму явлений, имеющих муссонный характер проявления.

Осенью 2012 г. (в период с сентября по ноябрь) на территории Приморского края отмечались сильные осадки, их общая сумма превысила норму более чем в 2 раза. Сумма осадков для каждого месяца осени отдельно также близка к двум месячным нормам с максимумом 221 % в ноябре. Это была самая влажная осень, начиная с 1947 г.

В 2013 г. случилось катастрофическое наводнение на р. Амур. В период с мая по август 2013 г. на водосборе р. Амур от образующих притоков до нижнего течения ежемесячно наблюдались дожди, превышающие норму в среднем в 1,4 раза. Наиболее значительные осадки (до 2 и более норм) наблюдались в мае в верховье Амура и бассейне Буреи, в июле и двух первых декадах августа – в верхнем течении Амура, местами – в бассейнах Буреи и Уссури. В сентябре в среднем по бассейну осадков было около нормы, что поддерживало экстремально высокий уровень реки. На территории Приморского края наиболее сильные дожди отмечались в июле, на большинстве станций норма была превышена в два и более раз (в районе Рудной Пристани превышение составило 4,3 нормы – 528 мм).

Не останавливаясь подробно на следующем пятилетнем периоде, заметим, что он также отличался высокой повторяемостью ОЯ. Чаше других регистрировались сильные продолжительные дожди. Наблюдалось систематическое воздействие

циклонов тропического происхождения (до двух циклонов за сезон). Так, для Уссурийского городского округа крайне неблагоприятные погодные условия наблюдались в августе 2015, 2017 и 2018 гг., когда выпадало до 2–3 месячных норм осадков, с подтоплением города и его окраин.

В августе 2019 г. на территории Приморского края вновь отмечались сильные продолжительные дожди. Во Владивостоке сумма осадков достигала 522 мм (превышение нормы примерно в 3 раза), в Партизанске зарегистрировано 393 мм, в Дальнереченске, Пограничном, Полтавке, Посъете – тоже более 300 мм.

В ноябре 2020 г. (19 ноября) на юге Приморского края наблюдался гололёд, характеристики которого соответствуют критериям ОЯ [6]. Во Владивостоке диаметр гололёда достигал 28 мм, продолжительность явления – 210 часов. На станции Анучино диаметр отложений составлял 29 мм, продолжительность явления – 15 часов, максимальный вес отложений – 184 г. На станции Тимирязевский диаметр отложений – 7 мм, продолжительность явления – 66 часов, максимальный вес отложений – 56 г. Указанные характеристики гололёда не превысили ранее зарегистрированных, однако нанесли катастрофические последствия в виде обрывов линий электропередач, связи, поваленных деревьев, щитов и прочее. Только во Владивостоке продолжительность гололёда достигла предельных значений.

В 2021 г. на территории Дальнего Востока в целом и в Приморском крае в частности наблюдалось чрезвычайно сухое и жаркое лето, акватории Японского моря и западной части Охотского моря были крайне перегреты. Средние температуры июля на территории Приморского и Хабаровского краев, Сахалина и Якутии были выше средних многолетних на 2–4 °С.

В сентябре 2022 г. на юго-востоке Приморского края отмечались очень сильные дожди, обусловленные выходом тайфуна HINNAMNOR. За двое суток здесь выпало 200–260 мм дождя (порядка 2 месячных норм). Дождевыми паводками и селями были затоплены пониженные участки местности, прервано сообщение с рядом населенных пунктов. Погибли люди. В декабре на этой же территории края прошли очень сильные снегопады. ОЯ были зарегистрированы на 7 метеостанциях края. За двое суток сумма осадков на большей части края достигла 1–2 месячных норм, в Кавалеровском и Ольгинском районах – 5–6 месячных норм (117–131 мм). Выпадение снега сопровождалось метелями, во Владивостоке и на побережье края – очень сильным ветром (до 27–32 м/с); на отдельных мысовых станциях зафиксирован ветер ураганной силы (до 33–35 м/с). На дорогах края образовались снежные заносы. Высота снежного покрова составляла 15–64 см, в Кавалеровском и Ольгинском районах – 115 и 102 см соответственно.

В августе 2023 г. на территории Приморского края вновь наблюдались сильные продолжительные дожди. Сумма осадков за месяц почти на всей территории края превысила норму в 2–4 раза, во Владивостоке – в 3,6 раза. В течение месяца дожди разной интенсивности на станциях края отмечались в течение 20–25 дней; на ряде станций дожди в градации сильные и очень сильные зафиксированы до 5–7 раз. На рис. 1 приведены суммы осадков на территории Приморского края в августе 2023 г. и их отношение к норме.

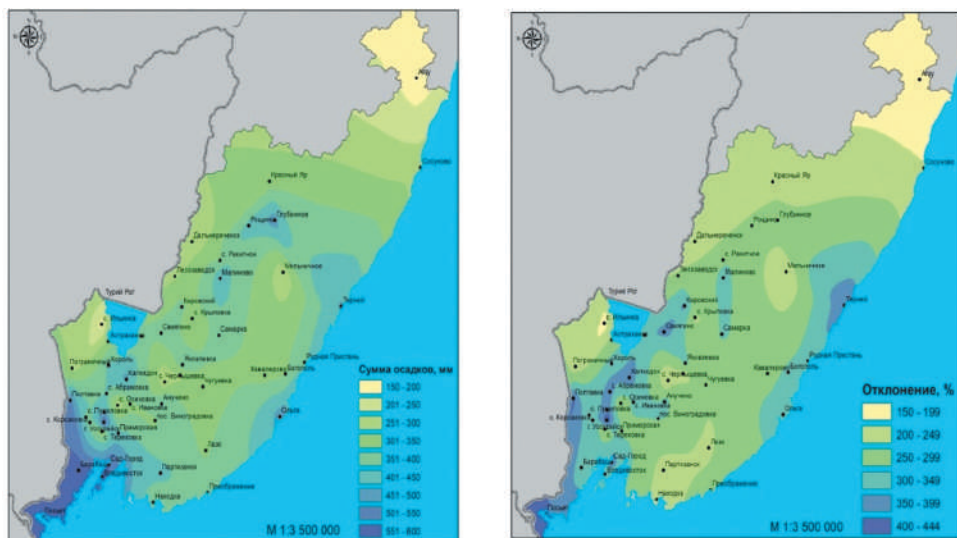


Рис. 1. Сумма осадков по территории Приморского края в августе 2023 г.

За месяц во Владивостоке зафиксировано 558 мм дождя – рекордное значение с 1936 г., в Посьете – 600 мм, в Глубинном – 480 мм, в Уссурийске – 462 мм, в Астраханке – 324 мм. Во Владивостоке дожди подобной интенсивности отмечались лишь в 2019 г., когда сумма осадков за месяц составила 522 мм, что более чем на 100 мм превысило прежние максимумы 1938 и 1943 гг. и их отношение к норме.

Данные, методы обработки

Исходными данными о сумме осадков и уровнях воды на реках Приморского края являлась информация с наблюдательной сети гидрометеорологических станций и постов ФГБУ «Приморское УГМС». Также использовались базы данных исторических гидрометеорологических наблюдений, которые поддерживаются в ФГБУ «ДВНИГМИ».

Для оценки характера атмосферной циркуляции рассчитывались индексы суммарного (интегрального) переноса воздуха через выделенные районы, позволяющие объективно оценивать состояние атмосферной циркуляции. Работа выполнена в рамках темы 1.3.6 НИОКТР «Росгидромета» 2019–2024 гг. Техника расчета изложена в разделе «Направление работ», далее «Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень», далее «Терминология и сокращения» [7] на официальном сайте ФГБУ «ДВНИГМИ».

Исходными данными для расчета аномалий температуры поверхности Японского моря служили ежедневные значения среднесуточной температуры поверхности моря (SST) в узлах сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, доступные в рамках проекта Office of Marine Prediction (JMA) <https://www.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/trtdb/jma-pro.html> [8].

Ежедневные значения SST усреднялись по декадам, рассчитывались аномалии относительно средних многолетних значений за период с января 1985 по июнь

2011 г. (период усреднения определялся наличием однородных исходных данных на начальном этапе данной работы). Работа также выполнялась в рамках темы 1.3.6 НИОКТР «Росгидромета» 2019–2024 гг.

Синоптические условия

Основным синоптическим объектом, определяющим погодные условия на территории Приморского края в августе 2023 г., являлся стационарный атмосферный фронт, в зоне которого систематически образовывались волновые циклоны. Фронтальная система отличалась высокой устойчивостью в пространстве и времени, обусловленной взаимодействием стационарной высотной ложбины и очень активного тихоокеанского гребня. Ось ложбины была ориентирована с северо-восточных районов Китая на Желтое море, территория Приморского края находилась в её передней части. Высотный гребень распространялся от субтропической тихоокеанской области высокого давления к северным островам Японии и далее к Татарскому проливу и прилегающим районам материка. На активность высотного гребня указывали значительные положительные аномалии геопотенциальных высот в его зоне, превышающие норму на 5–7 дам (рис. 2) [7].

Многочисленное воздействие (вхождение в зону фронта) циклонов тропического происхождения обостряло фронт, подпитывало тропическим теплом и влагой. Об активности атмосферного фронта свидетельствуют повышенные термические градиенты в его зоне и свойственное этому распределение аномалий температуры воздуха. Температура воздуха в нижнем слое тропосферы в области теплой воздушной массы, прилегающей к фронту, в среднем за месяц превышала норму на 3 °С; в холодной воздушной массе температура воздуха была ниже нормы чуть более чем на 1 °С [7].

Для примера более подробно остановимся на синоптической ситуации последней декады месяца, в течение которой выпало более половины месячной суммы осадков. В этот период отмечалось две волны сильных дождей. В период с 22 по 26 августа сильные дожди на территории Приморского края, как и в течение большей части месяца, определялись стационарным фронтом и волновыми

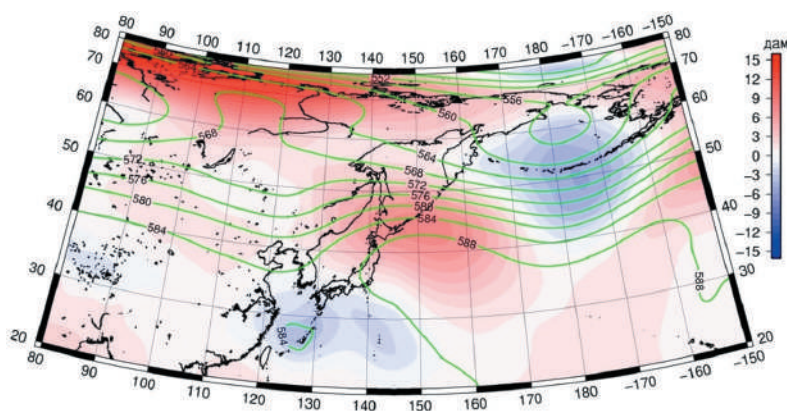


Рис. 2. Среднее поле H500 (изогипсы) и его аномалии (изополосы) в августе 2023 г.

южными циклонами. Волновые циклоны развивались над южной частью Желтого моря, не получая развития, стремились на северо-восток; лишь 25 августа один из них перевалил через северную Корею в Японское море и проследовал вблизи побережья Приморского края. Впрочем, его глубина не опускалась ниже 1004 гПа. 22 августа на юге края возобновились дожди. Их суточное количество в южных районах составляло 6–9 мм, в западных районах – до 62 мм. 23 числа дожди отмечались на большей части края, в отдельных районах их суточное количество достигало 99 мм, во Владивостоке – 110 мм. В дальнейшем, 24–26 августа, дожди продолжались, наиболее сильные отмечались в южных и центральных районах края 25 числа, в восточных районах – 26 августа.

Заключительная волна фронтальных осадков пришла на 29–30 августа. На рис. 3 и 4 приведены спутниковое изображение облачности и карта приземного анализа на момент наиболее сильных дождей на юге края, соответственно за 7:30 и 6:00 ВСВ 29 августа, демонстрирующие развитие атмосферного фронта и южного циклона. За двое суток на юге края выпало до 180–210 мм дождя, что превышает месячную норму.

Исследуя интегральные потоки воздуха в тропосфере в среднем за месяц, можно утверждать, что развитие синоптической ситуации в регионе было крайне аномальным. Интегральный меридиональный перенос воздуха над территорией Приморского края и Японским морем во всем слое тропосферы, в течение месяца направленный с юга на север, превышал норму более чем в три раза. В категориях стандартных отклонений (σ) в средней тропосфере он достигал 2,3–2,7 σ . При этом зональная циркуляция была подавлена. К этому следует добавить, что в смежной субполярной климатической зоне (50–70° с. ш.) над регионом наблюдались очень активные вторжения воздуха с Арктики (перенос воздуха с севера превышал норму почти в четыре раза!). Такое распределение воздушных потоков многократно усиливало активность (запас потенциальной энергии) фронтальной зоны умеренных широт.

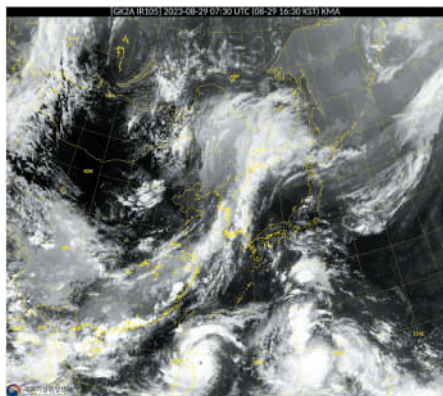


Рис. 3. Спутниковое изображение облачности за 07:30 ВСВ 29 августа 2023 г.

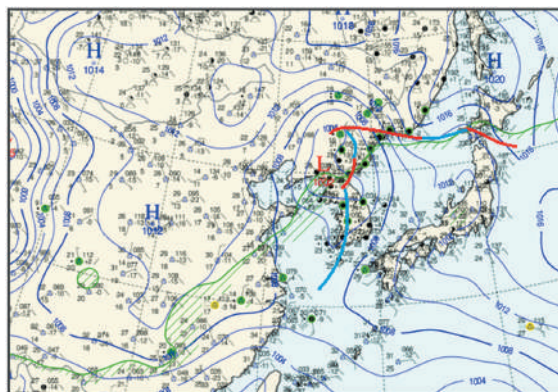


Рис. 4. Карта приземного анализа за 06 ВСВ 29 августа 2023 г.

Немаловажную роль в формировании погодных условий августа сыграли гидрометеорологические условия, сложившиеся в июне-июле. Упрощая ход погодных условий на территории Приморского края в этот период, можно сказать, что погода была очень теплой. Аномалии температуры воздуха на большей части края достигали $+2...+3$ °С. Июнь был влажным (норма осадков была превышена в 1,8 раза), июль увлажнен в пределах нормы.

Особенности термических условий Японского моря

Формированию активного полярного фронта над территорией Приморского края способствовал, в том числе, и значительный прогрев Японского моря. Уже в июне температура поверхности большей части моря была выше средней многолетней. Аномалии температуры верхнего слоя воды в течение месяца нарастали от $+3,2$ °С до $+5,0$ °С, от первой к третьей декаде месяца. Зона положительных аномалий температуры воды к третьей декаде распространилась на всю акваторию, за исключением Татарского пролива, где температура поверхности моря была близка к норме [7].

В июле температура поверхности большей части акватории оставалась выше климатической нормы. Значительные аномалии, превышающие $+3,0$ °С, наблюдались в первой декаде в центральной части моря, во второй и третьей декадах – на востоке акватории, в течение всего месяца – на севере Татарского пролива. В Татарском проливе во второй и третьей декадах аномалии температуры воды достигли $+4,6$ °С. Только на юго-западе акватории и локальном участке у восточного побережья Приморского края температура поверхности моря осталась близкой к средней многолетней. На рис. 5 приведены карты распределения температуры поверхности Японского моря с аномалиями в центральных декадах июня и июля.

В августе поверхность моря оставалась перегретой. В первой декаде месяца в центральной части моря аномалии температуры воды достигали $+4,6$ °С.

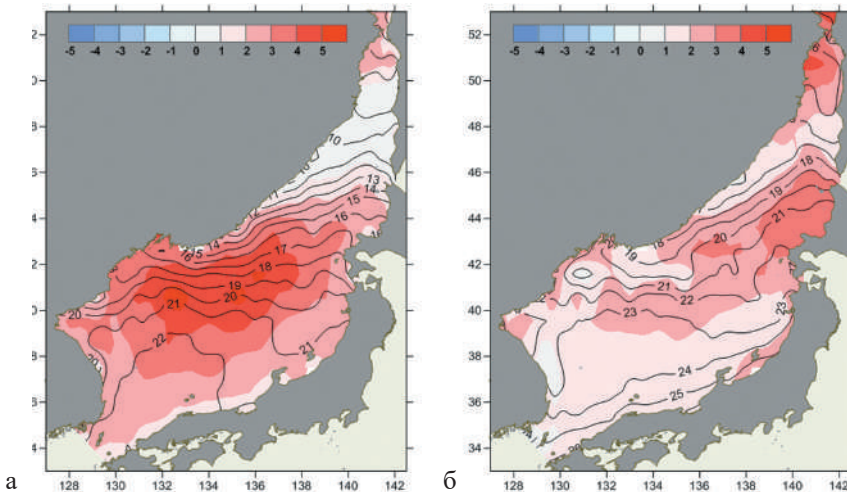


Рис. 5. Средняя декадная температура воды (изолинии) Японского моря и её аномалии (изополосы) во второй декаде июня (а) и второй декаде июля (б)

Во второй и третьей декадах на западе акватории поверхность моря стала заметно прохладнее, температура поверхности приблизилась к норме. Прекратилось повышение температуры воды и вблизи восточного побережья Приморского края, здесь аномалии температуры воды тоже близки к нулю (рис. 6).

Влияние тропических циклонов

Непосредственное влияние на погодные условия региона в августе 2023 г. оказывали два тайфуна, KHANUM и LAN.

Косвенное воздействие тропического циклона (ТЦ) KHANUM (за номером 2306) можно отнести к периоду 4–5 августа, когда он приблизился к акватории Японского моря с юга, обогащая тёплую воздушную массу тропическим воздухом. Непосредственное его влияние началось 10 августа, когда тропический циклон объединился с системой полярного фронта (рис. 7–8).

KHANUM с давлением в центре 994–998 гПа уже в статусе фронтального циклона продолжал медленно двигаться на север, северо-запад и приблизился к юго-западной границе Приморского края. Скорость максимального ветра в зоне циклона на этом этапе не превышала 15–20 м/с.

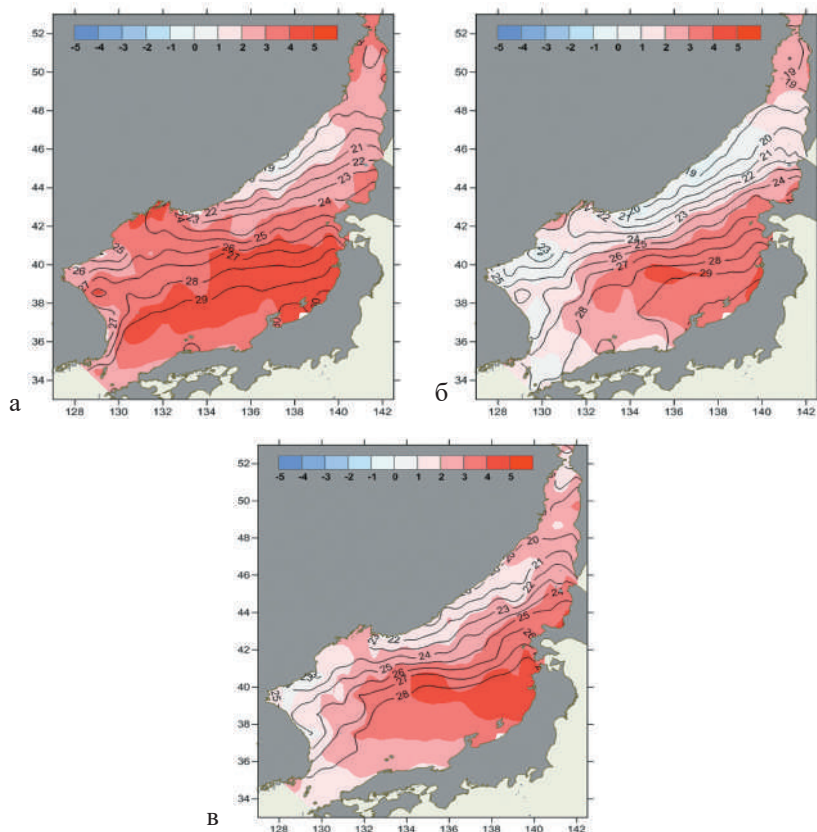


Рис. 6. Средняя декадная температура воды (изолинии) Японского моря и её аномалии (изополосы) в августе 2023 г.: в первой (а), второй (б) и третьей (в) декадах

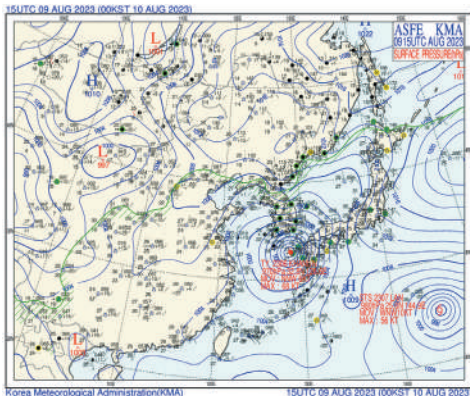


Рис. 7. Карта приземного анализа КМА за 15 ВСВ 9 августа

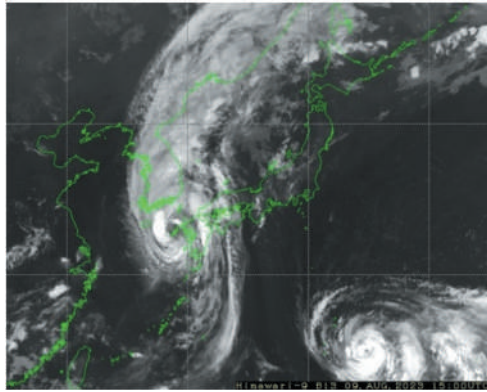


Рис. 8. Спутниковый снимок облачности за 15 ВСВ 9 августа

Наиболее сильные дожди с этим процессом прошли 9–10 августа на юге и западе края, в период 11–13 августа дожди наблюдались на всей территории Приморья. С 9 по 13 августа наибольшее количество осадков выпало в Черниговском (190 мм), Чугуевском (173 мм), Хасанском (169 мм), Октябрьском (158 мм), Яковлевском (127 мм), Лазовском (119 мм) и Ольгинском (62 мм) муниципальных округах, Уссурийском (130 мм) и Находкинском (95 мм) городских округах.

Вторым тропическим циклоном, оказавшим влияние на погоду Приморского края, стал тайфун LAN (за номером 2307). На юг Японского моря он вышел в 12 ВСВ 15 августа, перевалив через Японию по 135° в. д. При этом LAN деградировал до стадии тропического шторма, заполнившись до 990 гПа. В дальнейшем продолжал медленно подниматься на север, взаимодействуя с полярным фронтом. 17 августа в районе с координатами 44° с. ш., 138° в. д. без изменения интенсивности он трансформировался в циклон умеренных широт. 18 августа в системе полярного фронта LAN быстро двигался на северо-восток, вышел на южную часть Охотского моря. 19 августа через юг Камчатки переместился к Командорским островам, где вскоре заполнился.

Наибольшее влияние на погоду Приморского края LAN оказал 16–17 августа, находясь в непосредственной близости с юго-восточным побережьем Приморского края. Под влиянием тайфуна в крае прошли дожди разной интенсивности, на восточном побережье дожди были сильные. Больше всего осадков зафиксировано в Тернейском районе, до 49 мм. Столь сравнительно небольшое количество осадков было связано с компактностью ТЦ, его стремительностью и воздействием на погоду Приморского края преимущественно тыловой частью.

На рис. 9 приведены траектории всех ТЦ северо-западной части Тихого океана, в том числе тайфунов KHANUN (2306) и LAN (2307), получивших развитие в августе 2023 г. на северо-западе Тихого океана [7]. Цвет трека соответствует определенной интенсивности ТЦ: от депрессии до тайфуна, затем при заполнении вновь к стадии депрессии. Коричневый цвет на конце трека означает, что ТЦ трансформировался в циклон умеренных широт.

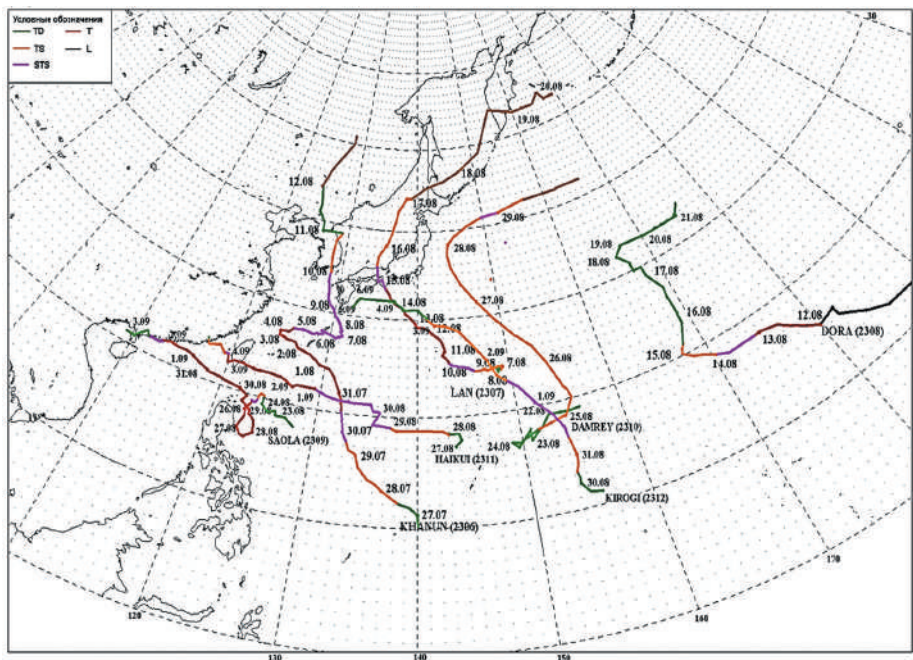


Рис. 9. Траектории тропических циклонов северо-западной части Тихого океана в августе 2023 г., в том числе ТЦ KHANUN (2306) и LAN (2307)

Паводки на реках Приморского края

Вода в реках южных районов Приморского края начала прибывать уже 9 августа. В результате дождевых паводков особенно пострадал г. Уссурийск, где ситуация обострилась из-за прорыва дамбы. Были затоплены несколько районов города, в том числе район Семи Ветров. Вода поднималась до вторых этажей многоквартирных домов. Не все жители успели эвакуироваться заранее, многих вывезли на лодках волонтеры и спасатели МЧС. Серьезный урон был нанесен сельскому хозяйству, дорожной инфраструктуре, социальным объектам. 4 августа подтопленными оставались шесть районов города (рис. 10–11).

Город Уссурийск – второй по величине и значимости город в Приморском крае. Через него проходит транссибирская железнодорожная магистраль, федеральная автомобильная дорога А370 «Уссури». Несмотря на ряд предпринятых в 2016–2023 гг. мер, направленных на повышение безопасности населения и инфраструктуры г. Уссурийска, городская агломерация и сельскохозяйственные районы регулярно затапливаются, ущерб экономике и социальной инфраструктуре не снижается, а скорее даже возрастает. Практически после каждого стихийного бедствия местные власти обращаются за помощью к правительству Приморского края.

При прохождении крупных паводков селитебная зона г. Уссурийска, в пределах которой сливаются поймы р. Комаровка и ее правого притока р. Раковка, практически полностью затапливается.



Рис. 11. Разлив реки Раздольная
(фото ТАСС от 14 августа 2023 г.)



Рис. 10. Районы Уссурийска в период
наводнения 9–14 августа 2023 г.

Глубина затопления на больших территориях достигает 3 м, а скорости течения – 1,5 м/с и более. Особенно сильно затопляется устьевая часть близ г. Уссурийска, где во время сильных наводнений движение паводочных волн осложняется подпором уровня от защитных дамб, мостовых переходов и рекой Раздольная. В верховьях р. Раковка находится водохранилище Раковское, которое является основным источником централизованного водоснабжения г. Уссурийска. Водоохранилище оказывает регулирующее влияние на прохождение волн паводка, однако может создавать техногенную опасность разрушения плотины или залповых нерегулируемых сбросов больших объемов воды. Паводковая ситуация осложняется также сбросами из водохранилища, расположенного на территории КНР.

12 августа 2023 г. уровень воды на посту с. Тереховка р. Раздольная достиг отметки 891 см, превысив на 20 см предыдущий исторический максимум 1943 г. По имеющимся данным наблюдений, обеспеченность указанного уровня воды для поста с. Тереховка составляет 1–2 % (явление наблюдается 1 раз в 50–100 лет).

Из десятка наиболее выдающихся паводков за период инструментальных наблюдений (с 20-х гг. XX в.) более половины из них приурочены к периоду 1931–1965 гг. При этом начиная с 2016 г., исключая 2021, каждый год наблюдалось превышение среднемноголетних значений максимальных уровней воды на посту с. Тереховка. Основной же причиной катастрофического наводнения в августе 2023 г. являлись дожди высокой интенсивности, которые выпали на переувлажненный предыдущими осадками водосбор.

Заключение

Подводя итог, можно заключить, что в августе 2023 г. и в предшествующий летний период в целом на Дальнем Востоке сформировались аномальные синоптические условия. Были крайне обострены меридиональные формы атмосферной циркуляции, способствующие выходу тропических циклонов и выносу перегретого влажного тропического воздуха на акваторию Японского моря и прилегающие прибрежные районы суши. Это сочеталось с активными холодными вторжениями в смежных субполярных районах. Зафиксированные суммы осадков и уровни воды на юге края превысили исторические максимумы. Эти явления вполне

укладываются в концепцию нарастания экстремальности климата как в регионе, так и в глобальном смысле.

Литература

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме // СПб.: Научно-технологические технологии. – 2022. – 124 с.
2. Коршунова Н. Н., Булыгина О.Н., Разуваев В.Н. Оценки экстремальности температурного режима и режима осадков для территории РФ и ее регионов // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2018. Вып. 183. – С. 20–30.
3. Огурцов Л. А., Чередыко Н.Н., Волкова М.А., Журавлев Г.Г. Динамика показателей экстремальности климата на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана, 29, № 8 (2016). – С. 633–639. DOI: 15372/AOO20160803
4. Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. – P. 1–22. D05109. DOI: <http://dx.doi.org/>
5. Karl T.R., Nicholls N., Ghazi A. CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary // Clim. Change. 1999. V. 42, iss. 1. – P. 3–7
6. Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений / URL: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions> (Дата обращения: 16.04.2024).
7. Гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. – URL: <http://www.ferhri.org/npravleniya-rabot/proekty/2017-07-28-00-41-16.html> (дата обращения 16.04.2024).
8. NEAR-GOOS Regional Real Time Data Base / JMA Products – <https://www.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/rrtdb/jma-pro.html> (дата обращения 12.05.2024).

КАЧЕСТВО КАРТ АНАЛИЗА ВОЛНЕНИЯ ТИХОГО ОКЕАНА

Введение

Карты анализа волнения моря строятся на основании данных наблюдений: попутных судовых, стационарных буёв, спутников. В холодное время года учитываются состояние и расположение ледяного покрова. Но этого недостаточно, чтобы покрыть информацией огромные акватории морей и океанов. Дополнительно привлекаются карты приземного анализа, модельные и/или иные расчёты. В зависимости от опыта специалиста и объёма данных наблюдаются расхождения при проведении изолиний высот волн. В основном построенная карта отражает реальное состояние моря на текущий момент времени. Чаще всего различия наблюдаются в области максимума высоты волн, где в большинстве случаев отсутствуют данные наблюдений. Морские суда, основной источник информации о погодных условиях на море, избегают штормовые районы по причине соблюдения своей безопасности.

Ежедневные или срочные карты анализа высоты волн в Тихом океане составляются в прогностических подразделениях УГМС дежурным океанологом. Кроме того, подобная информация передаётся по каналам связи от основных Мировых центров (Япония, США). С 50-х годов XX столетия их приём-передача проводилась факсимильными аппаратами. Сегодня эти карты доступны по каналам связи Интернет.

Наиболее популярен и активно используется анализ волнения от Японского метеорологического агентства (JMA) как прогностическими подразделениями Росгидромета, так и в организациях, производящих экономическую деятельность на море. Более полувека продукция этого центра привлекает к себе пользователей. Однако, с одной стороны, карты построены на основании данных гидрометеорологических наблюдений, с другой, поскольку этой информации недостаточно, возникает вопрос о качестве проведённого объективного анализа. Больше это касается областей максимума. Мнение отдельных специалистов-океанологов, имеющих огромный опыт, а также штурманского состава, заключается в том, что на картах JMA высота волны занижена. В целях проверки данного предположения и проведена работа, результаты которой изложены ниже.

Материалы и методы

За период с декабря 2019 г. по май 2020 г. оценивались ежедневные карты анализа волнения от двух прогностических центров. Анализ от JMA [3] доступен за два срока 00:00 и 12:00 ВСВ. Аналогичная продукция HWS/NCEP Ocean prediction center (OPC) – только за 00:00 [2]. На рисунке 1 приведён пример карт этих центров.

Сравнительная оценка качества объективного анализа высоты волн проводилась по отношению к данным альтиметрических измерений дистанционного

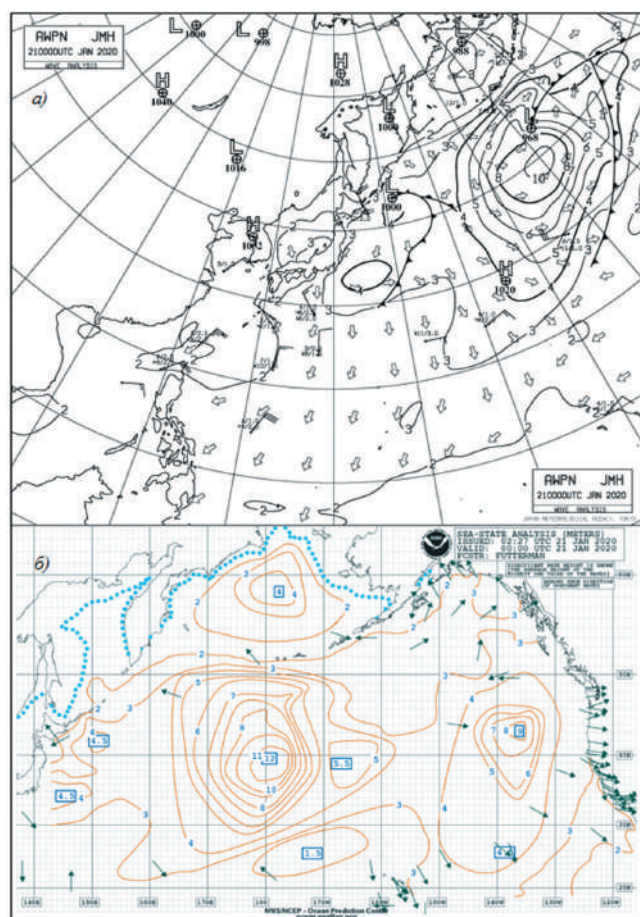


Рис. 1. Объективный анализ волнения ЖМА (а) и ОРС (б)

зондирования поверхности Земли со спутника Jason-3 проекта Aviso [1]. При помощи радиолокатора измеряется время, необходимое импульсу для прохождения от антенны спутника до поверхности и обратно к приемнику. В сочетании с точными данными о местоположении спутника, альтиметрические измерения позволяют определить уровень морской поверхности, в том числе и высоту волны. Пространственный шаг между измерениями приблизительно равен $3'$, или порядка 5–6 км.

По причине отсутствия объективного анализа состояния поверхности моря в цифровом виде для сравнения с данными Jason-3, проведена субъективная сравнительная оценка высот волн, снятых с карт вручную. Рассматривались наблюдаемые высоты волн, близкие к временному сроку 00 и 12 ВСВ с интервалом ± 30 минут. Невозможно сравнить все спутниковые измерения по причине учащенного зондирования с аналогичными точками на карте. По акваториям дальневосточных морей и Тихому океану выбирались значения в точках, кратные $0,5^\circ$ географических

координат, или близкие к областям максимума. Минимальная оцениваемая высота волны равнялась 2 м, что соответствует наименьшей изолинии на картах ЖМА.

Результаты и обсуждения

Построенные ряды синхронных данных высоты волн объективного анализа и спутниковых измерений в дальнейшем были подвергнуты статистической обработке, результаты которой приведены в таблице 1. Приняты следующие обозначения, которые будут использоваться по тексту и в таблице: $Bias$ – систематическая ошибка (м), $|\bar{\Delta}|$ – средняя абсолютная ошибка (м), \bar{q} – средняя относительная ошибка (%), \bar{S} – средняя квадратическая ошибка, σ – стандартное отклонение от среднего, r – коэффициент корреляции, SI – индекс рассеивания (разброс ошибок).

Из первых четырёх строк таблицы видно, что объективный анализ ЖМА занижает высоту волн по сравнению к измерениям спутника. Данные от ОРС близки к наблюдениям Jason-3, с незначительным завышением. Остальные все оценки соизмеримы между собой и говорят о высоком качестве карт объективного анализа этих центров.

Таблица 1. Статистические оценки сравнительного анализа высоты волн (м)

	Jason-3	ЖМА	Jason-3	ОРС
Среднее	3,90	3,79	3,45	3,50
σ	1,50	1,32	1,19	1,22
Максимум	9,1	8,2	6,6	7,2
$Bias$	-0,11		0,04	
\bar{S}	0,36		0,33	
$ \bar{\Delta} $	0,22		0,16	
\bar{q}	2,37		2,48	
r	0,98		0,96	
SI	0,09		0,09	
\bar{S} / σ	0,24		0,27	

Вклад в \bar{S} систематической составляющей ошибки больше в данных ЖМА (0,18) по сравнению с ОРС (0,08).

Разброс данных на рисунке 2, а показывает занижение высоты волн во всём диапазоне для ЖМА. Подтверждением данного эффекта служит и уравнение регрессии, приведённое в верхней части графика. Угол наклона линии регрессии в 5° можно использовать для коррекции реальной высоты волны при использовании карт ЖМА на практике.

Для карт ОРС, при сравнении со спутниковыми измерениями, наблюдается симметрия в расположении данных, т. е. по осям абсцисс и ординат они равны между собой. В области максимальных значений (правая верхняя часть рисунка 2, б) заметно завышение высоты волн приблизительно на 10 %.

Возвращаясь к рисунку 1, можно видеть значимые различия в областях максимума на двух синхронных по времени картах. Подобное наблюдается очень часто,

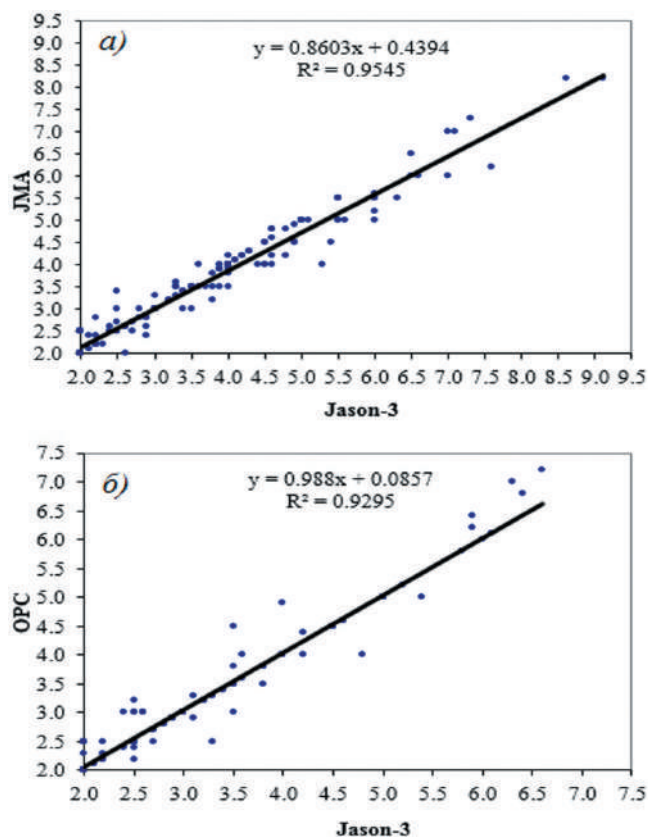


Рис. 2. Сравнение высоты волн

особенно при прохождении барических образований, вызывающих сильное волнение.

Провести сравнительный анализ между собой высоты волн двух этих центров и одновременно с данными спутниковых измерений представляет большую сложность. Одна из причин – это отсутствие карт OPC за срок 12:00 ВСВ. Поскольку витки Jason-3 за 0 и 12 часов разные, очень часто за срок 00:00 ВСВ пролёт приходится в восточной части Тихого океана за 150° з. д. и южнее 50° с. ш. На японских картах эта область отсутствует (рисунок 1а). Сравнивая между собой данные объективного анализа JMA и OPC, можно получить вывод лишь о том, что на картах наблюдается занижение высоты волны, в особенности максимумов, первого источника над вторым.

В проведённой работе присутствует доля субъективизма по причине отсутствия карт в цифровом виде. Визуальная интерпретация при определении высоты волн вносит некоторые ошибки в значения, которые затем сравниваются со спутниковыми измерениями.

Нет полной уверенности, что данные проекта Aviso не используются в процессе объективного анализа при построении карт волнения. С другой стороны,

приведённые оценки показали значимые различия в областях максимумов, что не должно наблюдаться при использовании этой информации. С большой долей вероятности можно утверждать об отсутствии данных измерений Jason-3 в процессе построения карт.

Выводы

Сравнительный анализ карт волнения по акватории Тихого океана показал, что наибольшие расхождения наблюдаются в областях максимума. Статистические оценки качества высоты волн, полученные при соотношении к спутниковым альтиметрическим измерениям, позволяют получить следующие выводы.

1) Объективный анализ ОРС точнее воспроизводит фактическое состояние поверхности моря, но максимум завышен.

2) Карты JMA занижают высоту волн во всём диапазоне значений, и особенно в области максимума.

Несмотря на выявленные различия, продукция этих прогностических центров имеет высокое качество, подтверждённое более чем полувековой историей. На практике эти карты анализа волнения широко используются при планировании и проведении работ на море.

Литература

1. AVISO⁺ official site. URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html> (дата обращения: 04.04.2024)
2. Sea State Analysis / NWS/NCEP – Ocean prediction center. – Обновляется в течение суток. URL: <https://ocean.weather.gov/shtml/pjba99.gif> (дата обращения: 04.04.2024)
3. Sea waves / Japan meteorological agency. – Обновляется дважды в сутки. URL: https://www.data.jma.go.jp/gmd/waveinf/chart/awpn_e.html (дата обращения: 04.04.2024)

МОРСКИЕ НАВОДНЕНИЯ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ОЛЮТОРСКОГО ЗАЛИВА (ЗАПАДНОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ БЕРИНГОВА МОРЯ) В ЛЕДОВЫЙ ПЕРИОД

Введение

Наводнения, возникающие на побережье океанов и морей, являются опасными природными явлениями, которые «... могут представлять угрозу жизни или здоровью граждан, а также наносить значительный материальный ущерб» [10].

Они приводили к катастрофическим последствиям на побережье Бенгальского и Мексиканского заливов, Северного, Балтийского и Каспийского морей [7]. Для защиты населения и береговой инфраструктуры от высоких подъемов уровня моря в Нидерландах, Санкт-Петербурге, Венеции, Лондоне построены комплексы гидротехнических сооружений [7].

Морские наводнения возникают практически на всем российском побережье дальневосточных морей [4–6]. При этом причиняемый ими ущерб существенно меньше, чем в перечисленных выше районах Мирового океана, что объясняется недостаточным экономическим развитием и слабой заселенностью дальневосточных берегов России.

Тем не менее, проблемы создания оптимальной и экономически обоснованной инженерной защиты береговых объектов, уменьшения рисков для населения во время морских наводнений являются для российского побережья Берингова, Охотского и Японского морей весьма актуальными. В рамках решения этих проблем в ФГБУ «ДВНИГМИ» разработаны метод и технология краткосрочного прогноза возможности возникновения этих опасных явлений в 31 береговом пункте. Метод предусматривает расчет ожидаемого подъема уровня моря в результате совместного влияния комплекса гидрометеорологических параметров: прилива, ветрового нагона (здесь и далее этот термин включает две составляющие: вызванную действием ветра и сформированную изменениями приземного атмосферного давления), волнового нагона и наката. В процессе создания метода прогноза выяснилось, что морские наводнения могут возникать при значительном развитии ледяного покрова на акватории морей, что приводит к трудностям учета эффектов, вызванных волнением в прибрежной зоне – волнового нагона и наката. Это привело к необходимости детального исследования характера и условий формирования таких явлений.

В статье рассматриваются условия возникновения морских наводнений в ледовый период на побережье одного из таких проблемных районов – Олюторского залива Берингова моря (рис. 1).

Исходные данные

В настоящее время на побережье Олюторского залива расположены два населенных пункта: Пахачи и Апука (рис. 1). Гидрометеорологические наблюдения

производятся только на морской г/м станции второго разряда (МГ-2) в селе Апука.

Для получения сведений о морских наводнениях, возникших в этих пунктах (рассматривался период с 1966 г. по 2023 г.), и данных гидрометеорологических наблюдений, выполнявшихся в этот период, использовались различные источники информации: режимные издания и фондовые таблицы ФГБУ «Камчатское УГМС» Росгидромета; сведения, опубликованные в СМИ; Интернет.

Для села Пахачи удалось найти описание только одного события – 15 ноября 1966 г., когда катерами осуществлялась эвакуация населения в безопасное место [3], но это наводнение произошло при отсутствии льда. Данный факт не является исчерпывающим доказательством отсутствия других морских наводнений в Пахачи. Как свидетельствует наш опыт, в пунктах, где отсутствуют гидрометеорологические станции и посты Росгидромета, опасные природные явления, если они не имеют экстраординарный характер, не регистрируются. Поэтому выполненные исследования основываются на сведениях, полученных только для села Апука (рис. 1).

Село расположено на песчано-галечной косе, которая во время штормов переливается морской водой, что приводит к затоплению береговых объектов (рис. 2). Например, 22 декабря 2022 г. были затоплены территории средней школы и детского сада, три жилых дома, в одном из которых вода поднялась выше уровня пола. Планировалась эвакуация населения [15].



Рис. 1. Район исследований



Рис. 2. Последствия наводнения в Апуке, возникшего в ледовый период [14]

Результаты и обсуждение

Для оценки режимных характеристик морских наводнений в Олюторском заливе в ледовый период предварительно следует определить границы этого периода применительно к решаемой задаче.

Если рассматривать распределение ледяного покрова на акватории Берингова моря по данным ИСЗ [13], возникает вопрос о корректном выборе района, для которого выполняется анализ ледовой обстановки. Визуальные наблюдения, выполняемые на МГ-2 Апука, позволяют оценить характеристики льда лишь в небольшой прибрежной зоне (дальность видимого горизонта в данном пункте составляет 7,2 км). Анализ этих наблюдений свидетельствует о значительной межгодовой изменчивости фаз развития и разрушения ледяного покрова. Для периода между сезонами 1995–1996 гг. и 2021–2022 гг. включительно дата первого льдообразования находится в диапазоне с 23 октября до 2 марта, дата окончательного очищения ото льда – с 11 марта до 6 июня. Основываться на этих датах нельзя. Дата первого льдообразования обычно фиксирует появление начальных видов льда (снежуры, шуги, ледяного сала), которые несущественно влияют на волнение и ветровой нагон. Дата окончательного очищения ото льда не учитывает количество, возраст и сплоченность льда перед его исчезновением. Поэтому для оценки характеристик морских наводнений в качестве ледового периода формально был выбран интервал времени с января по март.

Установлено, что явления возникали в Апуке в эти месяцы 11 раз: восемь в январе, два в феврале и одно в марте. В последние годы число наводнений в ледовый период резко увеличилось. Если с 1966 г. по 2019 г. они были зарегистрированы всего два раза – в 1979 г. и 1980 г. (правда, не исключено, что отдельные ситуации не были зафиксированы), то с 2020 г. по 2023 г. возникли 9 наводнений. Возможны несколько причин выявленной особенности. Во-первых, влияние могут оказывать изменения климата Земли, приводящие к увеличению интенсивности атмосферной циркуляции и трансформации ветрового и волнового режимов. Косвенно это предположение подтверждают наличие отрицательного многолетнего тренда числа дней со льдом в Апуке и увеличение максимальной высоты волн в данном пункте в последние годы. Влияние ледовитости Берингова моря, по-видимому, отсутствует, поскольку ее величина по некоторым оценкам в последние годы не уменьшается, а увеличивается [9]. Во-вторых, возможно, происходят изменения морфометрии береговой косы, на которой расположена Апука (обоснованность этого предположения можно проверить при помощи повторных топографических съемок высокой точности).

Рассмотрим условия формирования морских наводнений в Апуке на примере девяти ситуаций, возникших в 2020–2023 гг. (табл. 1). Во всех случаях лед на видимой поверхности моря в Апуке не наблюдался (следует отметить, что припай в данном пункте не устанавливается). Начальные виды льда или молодой лед иногда появляются до начала или после окончания явления. При этом спутниковые карты NASA [13] наглядно демонстрируют, что вдоль побережья Олюторского залива в основном с конца декабря по начало апреля существует полоса

Таблица 1. Гидрометеорологические характеристики во время наводнений в Алуке

Дата (ВСВ)	Фаза прилива	Максимальные значения во время явления			
		Высота волн, м	Суммарный уровень моря, см	Прилив, см	Ветровой нагон, см
10–11.02.2020 г.	Высокая малая вода	1,5	1 (43 + 3 часа)	8 (48 + 3 часа)	–4
1–2.01.2022 г.	Полная вода	1,3	78	77	8
27–28.01.2022 г.	Полная вода	1,3	60	68	–7
23.02.2022 г.	Высокая малая вода	1,3	27 (85 + 5 часов)	2 (60 + 5 часов)	25
22.01.2023 г.	Полная вода	1,5	87	74	13
26.01.2023 г.	Полная вода	2,0	51	48	4
28.01.2023 г.	Отлив	2,0	10 (59–4 часа)	3 (53–3 часа)	7
29.01.2023 г.	Полная вода	1,8	88	62	26
25.03.2023 г.	Полная вода	1,3	75 (86–2 часа)	27 (35–1 час)	52

Примечания:

1. Полужирным шрифтом в столбце *Дата (ВСВ)* выделен текст в ячейках, когда наводнение было наиболее интенсивным.
2. Суммарный уровень и прилив представлены относительно среднего уровня моря.
3. Для суммарного уровня моря и прилива в скобках приводятся максимальные значения, которые получены до наводнения (часы со знаком минус) и после наводнения (часы со знаком плюс).

дрейфующего льда, ширина которой изменяется приблизительно от 10 до 70 км (рис. 3). Приводимые факты свидетельствуют, что вдоль побережья Олюторского залива в течение практически всего ледового сезона возникает прибрежная полынья [12], иногда заполняемая приносным льдом. Формирование полыньи объясняется муссонным характером циркуляции атмосферы над Дальним Востоком: в зимнее время на побережье доминируют ветры, дующие с материка [8], что приводит к дрейфу льда от берега.

Визуальные наблюдения за волнением во время наводнений и в близкое к их возникновению время (17 измерений), несмотря на их субъективный характер, позволили выявить следующие закономерности:

- наводнения всегда (100 %) возникают при смешанном волнении;
- доминирует зыбь (94,1 %);
- направление зыби всегда ЮЗ (100 %);
- вторичное ветровое волнение в основном имеет СВ (47,1 %) и В (35,3 %) направления;

– максимальная высота волн равна 2,0 м (29 %), 1,5 м (24 %), 1,3 м (29 %), 1,0 м (18 %).

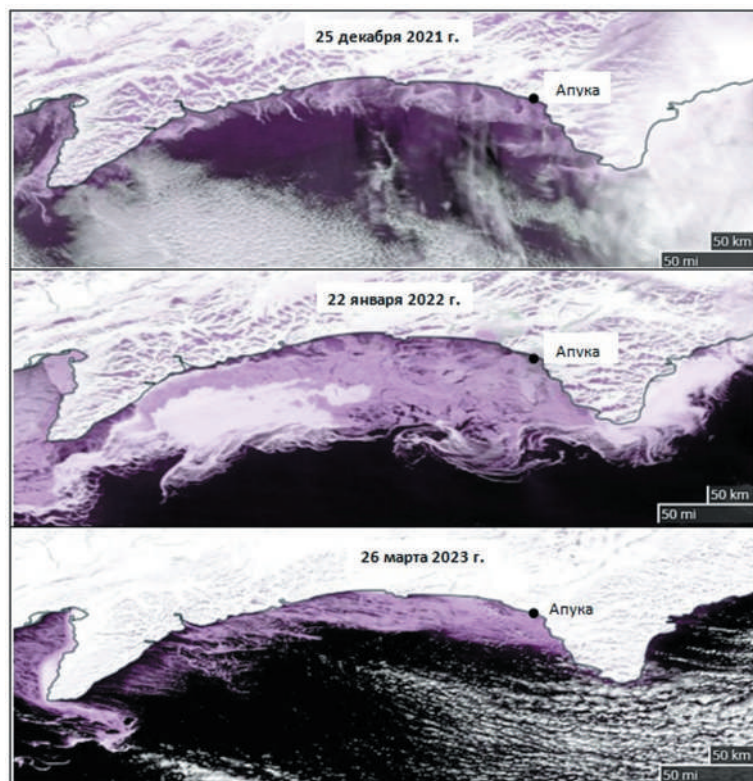


Рис. 3. Ледяной покров в Олюторском заливе в дни, ближайšie ко времени возникновения наводнений в Апуке [13]

Возможная максимальная высота наката с учётом волнового нагона, рассчитанная по методу, опубликованному в руководстве [11], составила: при высоте волн 1,0 м – 50 см, при высоте волн 1,5 м – 72 см, при высоте волн 2,0 м – 90 см.

Наблюдения над уровнем моря на МГ-2 Апука не производятся. Поэтому характеристики суммарного уровня моря и ветрового нагона во время наводнений (табл. 1) были рассчитаны по численной модели, которая используется в рамках метода краткосрочного прогноза уровня моря в юго-западной части Берингова моря [8]. Форсинг модели осуществлялся по прогностическим полям ветра на высоте 10 м и приземного атмосферного давления, рассчитанным с помощью региональной метеорологической модели WRF-ARW, адаптированной к Дальневосточному региону в ФГБУ «ДВНИГМИ» [8]. Прилив вычислялся по гармоническим постоянным восьми основных волн: K1, O1, Q1, P1, M2, S2, N2 и K2.

Основные особенности формирования морских наводнений в Апуке в ледовый период:

1. Наводнения могут возникать на любой фазе прилива, но наиболее значительные и хорошо выраженные, вызывающие наибольший ущерб явления формируются только на полной воде прилива (табл. 1).

2. Величина ветрового нагона в большинстве случаев незначительна, иногда вместо нагона возникает даже понижение уровня моря (табл. 1). Этот эффект объясняется тем, что береговая черта в районе расположения Апуки ориентирована в СЗ-ЮВ направлении. Как отмечалось ранее, вторичное ветровое волнение во время наводнений в основном имеет северо-восточное и восточное направления, следовательно, ветер направлен от берега в сторону моря, что приводит к уменьшению высоты ветрового нагона. В отдельных ситуациях, когда очень глубокие (950–960 гПа) циклоны выходят непосредственно в район Олюторского залива, понижение приземного атмосферного давления компенсирует действие ветра, и величина нагонов увеличивается (23.02.2022 г., 29.01.2023 г., 25.03.2023 г.).

3. Наводнения не всегда возникают при больших значениях суммарного уровня моря (например, 10–11.02.2020 г., 23.02.2022 г., 28.01.2023 г.). Временной сдвиг между ними может достигать от трех до пяти часов (табл. 1). Так как прилив является детерминированным процессом и рассчитывается с высокой точностью, можно предположить, что причиной отмеченной особенности являются погрешности расчета ветрового нагона по численной модели. Тем не менее, нельзя исключить недостаточно точную регистрацию времени формирования наводнений.

4. Прилив и волновые эффекты (волновой нагон и накат) вносят приблизительно равноценный вклад в формирование наводнений.

Полученные результаты позволяют сформулировать эмпирические критерии возможности возникновения затопления береговых объектов в Апуке в ледовый период, которые могут использоваться в оперативной работе учреждений Росгидромета:

1. Наличие прибрежной полыньи – чистая вода или начальные виды льда.
2. Преобладающее волнение – зыбь ЮЗ направления.
3. Максимальная высота волн – 1,3 м и более.
4. Значение суммарного уровня моря – 50 см и более.

Сведения о наличии прибрежной полыньи могут быть получены с помощью данных ИСЗ или оперативной информации, поступающей с МГ-2 Апука. Ожидаемые значения уровня моря рассчитываются в рамках действующего и утвержденного ЦМКП Росгидромета метода прогноза [8].

Наиболее сложным в практической реализации предлагаемого способа прогноза является расчет характеристик волнения. Во-первых, для юго-западной части Берингова моря отсутствуют методы прогноза состояния ледяного покрова высокого разрешения, способные надежно воспроизводить наличие (или отсутствие) полыньи и ее границы. Во-вторых, ширина полыньи в Олюторском заливе невелика и меньше расчетного шага сетки волновой модели, используемой в оперативной работе [1, 2]. Поэтому в настоящее время возможно следующее решение проблемы: выявление связи параметров зыби вблизи Апуки с характеристиками волн, прогнозируемыми до кромки льда по действующим оперативным региональным численным моделям. Ветровым волнением, возникающим непосредственно в прибрежной полынье, можно пренебречь.

Выводы

Морские наводнения на побережье Олюторского залива Берингова моря являются характерными для ледового периода. Их повторяемость в последние годы существенно увеличилась.

Основными факторами, вызывающими затопление объектов в Апуке в ледовый период, являются прилив (наиболее опасные явления происходят на полной воде), волновой нагон и накат. Доминирующую роль в формировании волновых эффектов играет зыбь, приходящая к берегам Олюторского залива под ледяным покровом. Влияние ветрового волнения, возникающего в прибрежной полынье, незначительно. Вклад ветрового нагона становится значимым только при выходе непосредственно в район Олюторского залива очень глубоких циклонов.

В оперативной работе для прогноза морских наводнений в Апуке могут быть использованы следующие критерии: существование прибрежной полыньи, наличие зыби юго-западного направления высотой 1,3 м и более, значение суммарного (включающего прилив) уровня моря 50 см и более над средним уровнем моря.

В перспективе необходимо создание численных моделей для прогноза ледовой обстановки и характеристик волнения в Олюторском заливе, базирующихся на вычислительных сетках высокого пространственного разрешения, корректно учитывающих физические механизмы взаимодействия волн со льдом.

Литература

1. Вражкин А.Н. Применение спектральных моделей волнения для акваторий дальневосточных морей и Тихого океана // Труды ДВНИГМИ. Юбилейный вып. ДВНИГМИ – 60 лет. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – С. 88–96.
2. Вражкин А.Н. Адаптация моделей WAVEWATCH и SWAN к акваториям дальневосточных морей / Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях. Под ред. Нестерова Е.С. М., Обнинск: Изд-во «Социальные науки», 2013. – С. 129.
3. Газета «Камчатская правда», № 274 от 20.11.1966 г.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том Х. Берингово море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. – 300 с.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том IX. Охотское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. – 342 с.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том VIII. Японское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. – 398 с.
7. Любичкий Ю. В., Шевченко Г.В., Елисов В.В. Штормовые нагоны / В кн. Мировой океан. Том I. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане. – М.: Научный мир, 2013. – С. 559–575.
8. Любичкий Ю. В., Романский С.О. Метод и технология краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря // Гидромет. иссл. и прогнозы. – № 1 (383), 2022. – С. 71–88.
9. Оганезов А. С., Минервин И.Г., Пищальник В.М. Новый этап исследования ледового режима Берингова моря на основе спутниковых данных // Наука России: цели и задачи. Сб. научн. трудов XXVI межд. научно-практ. конф., 10 апреля 2021 г. Изд. НИЦ Л-Журнал, Ч. 3, 2021. – С. 58–62.

10. РД 52.88.699-2008. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. – Обнинск: Тип. ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2008. – 33 с.

11. Coastal Engineering Manual. Part II: Coastal Hydrodynamics (EM 1110-2-1100). Books Express Publishing, 2012. – 624 p.

12. Sea Ice Nomenclature. WMO No. 259, 2014. – 121 p.

13. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/?v> (дата обращения 2024–05–22).

14. URL: <https://kamchatinfo.com/news/elements/detail/48174/> (дата обращения 2024-05-22).

15. URL: <https://kamchatinfo.com/news/elements/detail/53643/> (дата обращения 2024-05-22).

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ ТИХООКЕАНСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА

Введение

Знания о режимных характеристиках течений в поверхностном слое моря востребованы для решения многих прикладных задач [3]. Они необходимы для проектирования гидротехнических сооружений, моделирования литодинамических процессов в прибрежной зоне, прогнозирования дрейфа объектов во время проведения поисково-спасательных операций. Для оптимального решения экологических проблем, возникающих во время чрезвычайных ситуаций в результате аварийных выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, информация о течениях нужна для оценки динамики и размеров зон распространения, изменения концентрации поллютантов. Сведения о режиме течений необходимы для обеспечения судоходства (в особенности, в районах лимитирующих глубин), организации эффективной добычи минерального сырья на шельфе, рыбопромысловой деятельности (в областях вихревых структур возникают повышенные концентрации планктона [12]), создания и эксплуатации объектов марикультуры.

В данной статье приводятся результаты анализа материалов инструментальных наблюдений над течениями в области Тихого океана, прилегающей к юго-восточному побережью полуострова Камчатка. Район ограничен с севера м. Камчатский, с юга – м. Лопатка, с восточной стороны – приблизительно материковым склоном. Выполненные исследования позволили выявить основные особенности режима поверхностных течений в рассматриваемом районе и оценить порядок и соотношение их различных составляющих. Полученные результаты могут быть использованы для решения различных прикладных задач, а также для верификации и калибровки численных гидродинамических моделей динамики вод северо-западной части Тихого океана.

Материалы наблюдений

В рамках выполненных исследований анализировались материалы наблюдений над течениями на горизонтах от 0 м до 25 м. Выбор столь значительной нижней границы этого слоя определяется ограниченностью массива имеющейся информации (табл. 1). Если наблюдения на гидрологической станции осуществлялись на нескольких горизонтах, рассматривались данные только для горизонта, наиболее близкого к поверхности. Характеристики течений оценивались по данным 51 станции, расположенной в 33 точках (рис. 1) (в некоторых точках измерения выполнялись несколько раз, в разные месяцы и годы). На 24 станциях наблюдения выполнялись с помощью вертушек БПВ-2, на 27 станциях – ВММ (в основном этот тип вертушек применялся во время серий измерений суточной

Таблица 1. Характеристики использованного массива наблюдений над течениями (N – число станций)

Продолжительность измерений		Горизонт измерений		Месяц измерений	
час	N	метр	N	название	N
≤ 24	7	0	20	апрель	3
25–36	25	5	7	май	7
37–48	1	10	9	июнь	3
49–96	4	15	1	июль	11
97–144	3	20	1	август	7
145–216	8	25	13	сентябрь	13
217–288	2			октябрь	5
289–420	1			ноябрь	2

продолжительности). Дискретность наблюдений составляла от 5 до 60 минут. Большая часть наблюдений выполнена на горизонтах от 0 м до 10 м с дискретностью 60 минут и имеет небольшую продолжительность (в основном, менее 36 часов).

Измерения производились с апреля по ноябрь включительно (табл. 1), но небольшое число выполненных станций не позволяет оценить сезонные (внутригодовые) изменения параметров течений.

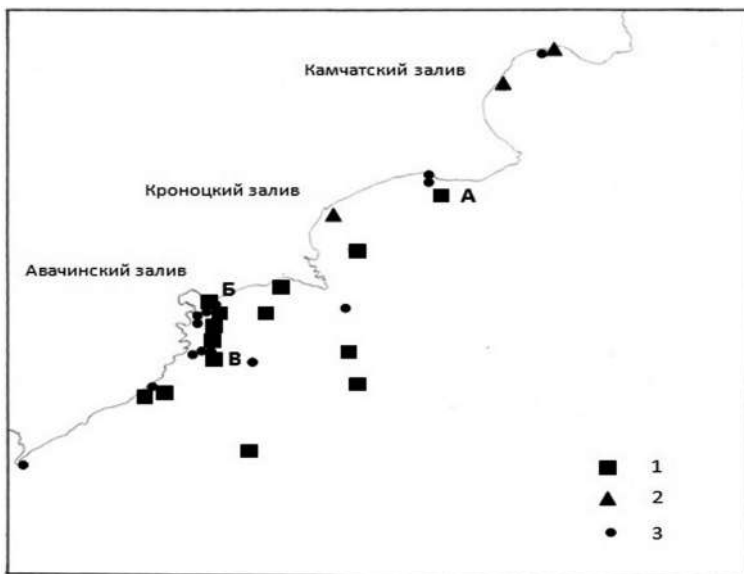


Рис. 1. Схема расположения точек наблюдений

1 – продолжительность измерений составляет более 5 суток; 2 – наблюдения в данной точке выполнялись на четырех суточных станциях в разное время; 3 – суточные серии измерений; буквами обозначены станции, информация для которых иллюстрируется рисунками 2 и 7

Методы исследований

Анализ материалов инструментальных наблюдений над течениями осложняется рядом проблем. Основные из них, сформулированные применительно к приливным течениям, приводятся в монографии [20]: непродолжительность рядов измерений, большой шум в данных, зависимость данных от используемых технологий измерений, значительные изменения характеристик течений по вертикали и горизонтали, нелинейные и прочие эффекты. При этом многие методы и технологии, традиционно применяемые для изучения режима течений [1, 4, 5, 7, 16, 17, 21–24], не могут быть использованы для обработки данных наблюдений в исследуемом районе из-за немногочисленности и небольшой длины имеющихся рядов (табл. 1).

Для расчета спектров зональной (U) и меридиональной (V) компонент скоростей течений рядов, имеющих достаточную продолжительность, применялась программа, разработанная Г.В. Шевченко [1]. Для детализации режима динамики вод рассматривались характеристики суммарных течений и их квазистационарной, приливной и непериодической составляющих.

Проблемой является определение направления и скорости квазистационарного течения. При небольшой продолжительности наблюдений усредненные за интервал измерений скорости фактически представляют собой сумму скоростей квазистационарного и непериодического течения, сформированного в данный промежуток времени метеорологическими условиями. Корректно разделить эти составляющие для исследуемого района на основе имеющегося информационного массива невозможно. Поэтому приводимые в статье характеристики квазистационарных течений, которые могут интерпретироваться только как их первое приближение, рассчитывались указанным выше способом лишь для станций, на которых продолжительность наблюдений составляла не менее пяти суток.

При обработке исходных данных применялся следующий алгоритм.

1. Проверялось наличие пропусков в наблюдениях. Если пропуски имели небольшую длину, отсутствующие значения восстанавливались с помощью линейной интерполяции.

2. Для рядов компонент скорости течения, имеющих достаточную продолжительность, вычислялись спектры.

3. Наблюдения с дискретностью измерений менее 1 часа обрабатывались с помощью фильтра Година [19] с последующей выборкой ежечасных значений.

4. Выполнялся визуальный анализ полученных рядов для принятия решения о возможности дальнейшей обработки данных и необходимости выбраковывания некачественной информации.

5. Осуществлялось сглаживание рядов компонент скорости течения. Экспериментально установлено, что наиболее эффективные результаты для коротких рядов обеспечивает фильтр скользящего равновесного осреднения ($2M + 1 = 5$, где $2M$ – интервал фильтрации), для длительных – фильтр Кайзера-Бесселя ($2M + 1 = 11$) [18].

6. Вычислялись средние за период наблюдений направление и скорость течения, которые для длительных рядов интерпретировались как характеристики

квазипериодического течения, для коротких рядов – как сумма квазипериодического и непериодического течений.

7. Рассчитывались максимальные скорости суммарных течений.

8. Ряды компонент скорости течения центрировались относительно их средних за период наблюдений значений.

9. Продолжительные ряды наблюдений сглаживались с помощью фильтра Кайзера-Бесселя ($2M + 1 = 49$) для получения непериодической составляющей суммарных течений.

10. При необходимости (и возможности) из рядов компонент наблюденных течений вычиталась непериодическая составляющая.

11. По рядам, полученным в пунктах 8 и 10, с помощью метода наименьших квадратов [19] рассчитывались характеристики приливных эллипсов основных волн. Для коротких рядов использовалось значение критерия Релея, равное 0.9, для продолжительных рядов – 1.0. Если наблюдения выполнялись с дискретностью менее 1 часа и для получения рядов ежечасных значений компонент скорости течения применялся фильтр Година (п. 3), предусматривалась компенсация эффекта сглаживания [19].

Небольшая длина рядов измерений течений в исследуемом районе позволяет корректно рассчитать характеристики только приливных волн M2 и K1. Поэтому в статье рассматриваются лишь эти волны.

Результаты и обсуждение

Частотная структура течений. Спектры компонент скорости течений были рассчитаны для станций с продолжительностью наблюдений более 5 суток. Интервал дискретности измерений для анализируемых рядов составлял 10, 20, 30 и 60 минут, длина рядов – от 121 до 1154 значений.

Вероятно, из-за небольшой длины обрабатываемых рядов и недостаточно высокого качества наблюдений только на отдельных станциях хорошо идентифицируются суточные и полусуточные приливные колебания. В основном для одной или обеих компонент эти колебания в спектрах отсутствуют или выражены очень слабо (рис. 2).

На некоторых станциях заметны инерционные колебания скоростей течений, которые для исследуемого района имеют период в диапазоне от 15.0 до 15.4 часов (рис. 2). В большинстве случаев эти колебания возникают после прохождения вблизи Камчатки циклонов. Тем не менее, в отдельных ситуациях отмеченная закономерность не проявляется, возможно причинами формирования инерционных колебаний являются перестройка поля приземного атмосферного давления или локальные эффекты.

Для многих станций (рис. 2) прослеживаются высокочастотные колебания скоростей течений, периоды которых можно объединить в группы: 8.0–8.8, 6.2–7.0, 4.7–5.4, 3.9–4.3, 3.1–3.2 часа. Периоды двух первых и двух последних групп хорошо согласуются с периодами мелководных (нелинейных) приливных волн, например, M3, M4, M6, M8. Колебания с периодами 4.7–5.4 часа близки к вариациям уровня

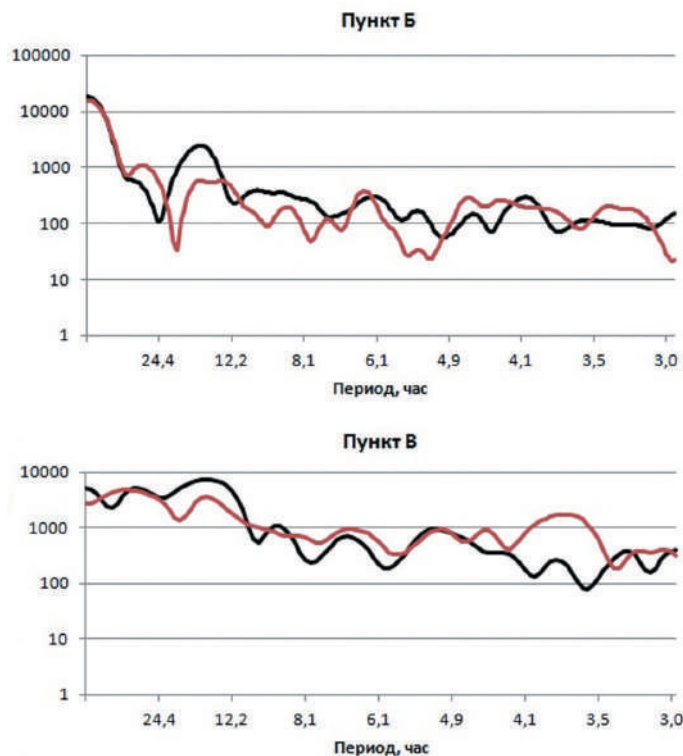


Рис. 2. Спектры компонент скоростей течений на станциях Б (горизонт 10 м, дискретность измерений 30 минут, длина ряда 503 значения) и В (горизонт 25 м, дискретность измерений 10 минут, длина ряда 1124 значения), $\text{см}^2/\text{с}^2 \cdot \text{ч}$

моря с периодом 4.7 часа в Авачинской губе и на акватории Авачинского залива, прилегающей к проливу между ними, которые были получены с помощью численного моделирования в работе [6].

Максимальные скорости суммарных течений. Ограниченность массива наблюдений над течениями в исследуемом районе не позволяет построить схему пространственного распределения максимальных скоростей суммарных (включающих квазистационарную, приливную и непериодическую составляющие) течений. Можно отметить лишь общую тенденцию уменьшения скоростей от материкового склона к берегу. Если игнорировать аномальные значения, полученные для отдельных станций, которые могут иметь случайный характер, максимальные скорости суммарных поверхностных течений составляют:

- в небольших бухтах в пределах Авачинского залива – 10–15 см/с;
- в Камчатском, Кроноцком и Авачинском заливах – 25–45 см/с;
- на акватории Тихого океана – 45–60 см/с.

Данная закономерность объясняется тем, что в мористой (восточной) части исследуемого района проходит хорошо выраженное Камчатское течение, влияние которого с приближением к берегу ослабевает [15].

Квазистационарные течения. В восточной части исследуемого района хорошо видно Камчатское течение, зарождающееся в западной части Берингова моря [10], со скоростями 30–35 см/с, направленное в юго-западном направлении, которое соответствует генеральной ориентации береговой черты (рис. 3). Величина скоростей течений хорошо согласуется с их характеристиками в Камчатском проливе [13] и юго-западной части Берингова моря [2].

В Камчатском, Кроноцком и Авачинском заливах скорости квазистационарных течений существенно меньше и в основном составляют 2–12 см/с (рис. 3).

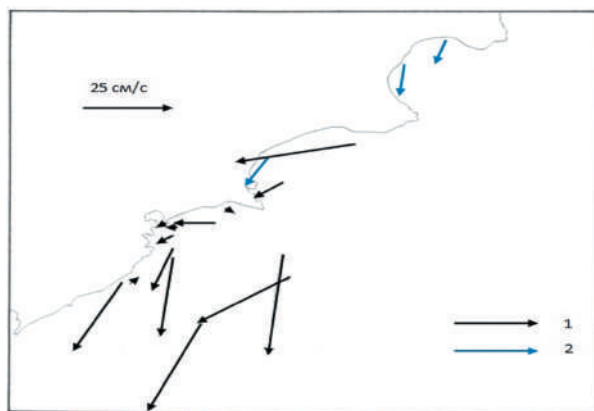


Рис. 3. Квазистационарные течения, см/с

1 – рассчитанные по наблюдениям на станциях с продолжительностью измерений более 5 суток, 2 – полученные усреднением по четырем суточным станциям

Данный результат подтверждает вывод, сделанный при анализе карт динамической топографии в работе [14] – основная струя Камчатского течения проходит на расстоянии 100–120 км от берега, приближаясь к нему в районе мысов.

Квазистационарные течения неустойчивы по направлению (это хорошо заметно в заливах, наиболее освещенных данными наблюдений), что указывает на наличие вихревых структур. Известно, что в исследуемом районе обычно одновременно наблюдаются несколько мезомасштабных антициклонических вихрей, перемещающихся в юго-западном направлении. Эти вихри имеют топографическое происхождение [8] и формируются в прибрежной зоне юго-западной части Берингова моря [9, 10] или непосредственно в заливах тихоокеанского побережья Камчатки [14]. Существование вихрей подтверждается различными индикаторами происходящих процессов: картами динамической топографии [14], распределениями температуры и солёности морской воды по данным гидрологических съёмок [14], спутниковой альтиметрией [12], температурой поверхности океана по информации ИСЗ [8, 10, 12, 14], распределением хлорофилла-*a* [12], дрейфом буев Арго и поверхностных дрейфтеров [10]. О наличии мезомасштабных вихрей в ледовый период свидетельствует распределение дрейфующего льда по данным ИСЗ (на рисунке 4 вихри видны на акваториях Камчатского и Кроноцкого заливов, в Авачинском заливе они не прослеживаются из-за отсутствия развитого ледяного покрова).

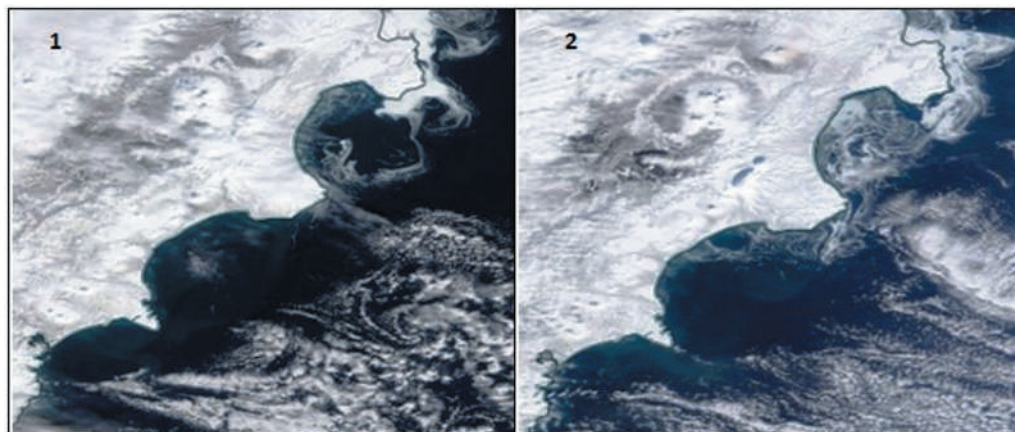


Рис. 4. Вихревые структуры вдоль тихоокеанского побережья Камчатки по данным ИСЗ 1, 2 – ледяной покров 27 февраля 2022 г. и 2 марта 2023 г. [24]

Горизонтальные размеры мезомасштабных вихрей в основном составляют 75–120 км, средняя скорость их перемещения – 3–5 км/сутки [10, 12, 14], максимальная – до 10 км/сутки [15]. Процессы, происходящие во время жизни вихрей, очень сложны: направления и скорости движения вихрей могут существенно изменяться [12, 14], вихри могут распадаться на несколько более мелких структур [12]. В частности, в статье [15] сделан вывод о возможности формирования в области между антициклоническими вихрями и границей шельфа в Авачинском заливе циклонических вихрей диаметром порядка 40 км.

Приливные течения. Рассчитанные по данным измерений характеристики приливных течений в исследуемом районе разнообразны: значения максимальных скоростей, ориентация и величина осей, поляризация (направление вращения векторов течений) приливных эллипсов отличаются для различных станций, даже выполненных в одной точке, но в разное время. Очевидно, что основными причинами этого являются недостаточно высокое качество измерений и небольшая длина рядов наблюдений. Поэтому объективно выявить закономерности пространственных изменений характеристик приливных течений по имеющимся данным не представляется возможным. В особенности это относится к фазам приливных волн. Ограничимся только некоторыми обобщенными оценками, главным образом полученными по наиболее длительным рядам. Для Камчатского и Кроноцкого заливов рассматривались также характеристики приливных течений, рассчитанные усреднением их значений для четырех суточных станций, выполненных в одной и той же точке (рис. 1). Большие полуоси приливных эллипсов волны M2 (т. е. максимальные скорости течения этой волны) в пределах Авачинского залива и прилегающей к нему акватории Тихого океана в основном составляют 2–4 см/с, в прибрежной зоне Камчатского и Кроноцкого заливов – 8–11 см/с. Данные значения хорошо согласуются с результатами расчетов по глобальным и региональной численной приливным моделям, приводимым в статье [11].

Вблизи берега большие оси приливных эллипсов в основном ориентированы вдоль береговой черты, но в районе, прилегающем к проливу между Авачинским заливом и Авачинской губой, прослеживается тенденция изменения ориентации приливных эллипсов – их большие оси отклоняются в сторону губы (рис. 5). Поляризация эллипсов волны M2 различна, но преобладает вращение вектора течения по часовой стрелке. Значения коэффициента реверсивности (отношение длин малой и большой полуосей приливного эллипса) для волны M2 находятся в пределах от 0,02 до 0,87, следовательно, течения могут быть как реверсивными, так и круговыми (рис. 5, 6). Вблизи м. Лопатка величина большой полуоси приливного эллипса волны M2 достигает 29 см/с при значении коэффициента реверсивности 0,02 (к сожалению, эти характеристики рассчитаны только по одной суточной серии наблюдений).

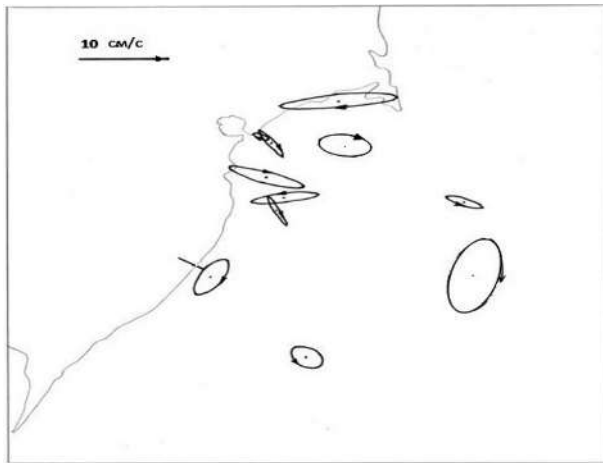


Рис. 5. Приливные эллипсы волны M2 для станций с продолжительностью наблюдений более 5 суток (южная часть исследуемого района)

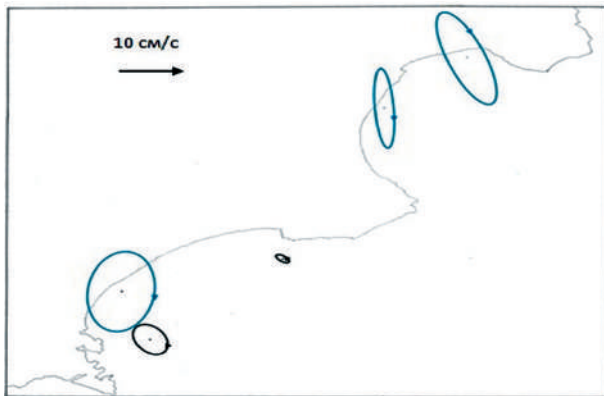


Рис. 6. Приливные эллипсы волны M2 (северная часть исследуемого района)
Черным цветом выделены эллипсы для станций с продолжительностью наблюдений более 5 суток, синим – усредненные для четырех суточных серий измерений

Причиной данной особенности является резкое увеличение скорости течения волны М2 в районе Первого Курильского пролива, отделяющего о. Шумшу от м. Лопатка, о чем свидетельствуют результаты численного моделирования [11].

Режим волны К1 в целом имеет аналогичные черты. При этом ориентация приливных эллипсов данной волны вдоль берега выражена более четко, чем волны М2. Можно предположить, что бароклинные эффекты в меньшей степени влияют на субинерционные суточные течения.

Диапазон изменений величины большой полуоси волны К1 в Авачинском заливе и на прилегающей к нему акватории Тихого океана равен 2–7 см/с (рис. 7). (В Камчатском и Кроноцком заливах рассчитать достоверные характеристики волны К1 невозможно из-за отсутствия данных наблюдений достаточной продолжительности).

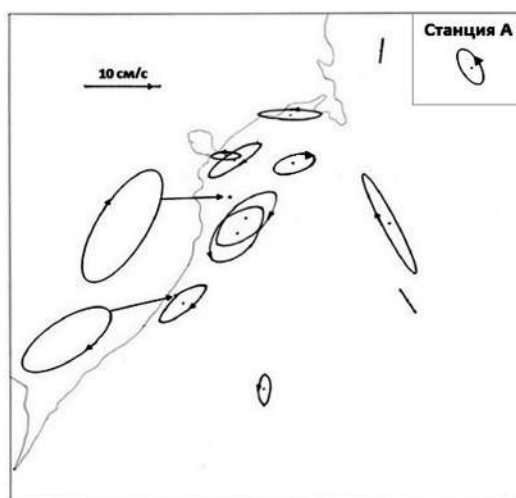


Рис. 7. Приливные эллипсы волны К1 для станций с продолжительностью наблюдений более 5 суток/ На врезке в правом верхнем углу приливной эллипс для станции А (см. рис. 1)

Полученные результаты подтверждают вывод, сделанный в статье [11] – в исследуемом районе скорости течений волны К1 больше, чем волны М2. Данное соотношение характерно и для приливных колебаний уровня моря: среднее отношение амплитуд волн К1 и М2 для исследуемого района составляет 1,35.

Непериодические течения. По данным наблюдений, в пределах исследуемого объекта максимальные скорости непериодических течений в поверхностном слое моря составляли 25–30 см/с (рис. 8). Скорость ветра на гидрометеостанции Петропавловский маяк (рис. 8) в периоды измерений течений в отдельные сроки достигала 15–20 м/с. Известно, что в прибрежных районах восточного побережья Камчатки при прохождении глубоких циклонов возникают более сильные ветры [2]. Поэтому можно ожидать, что скорости непериодических течений во время экстраординарных штормовых событий будут существенно превышать по величине квазипериодические и приливные течения.

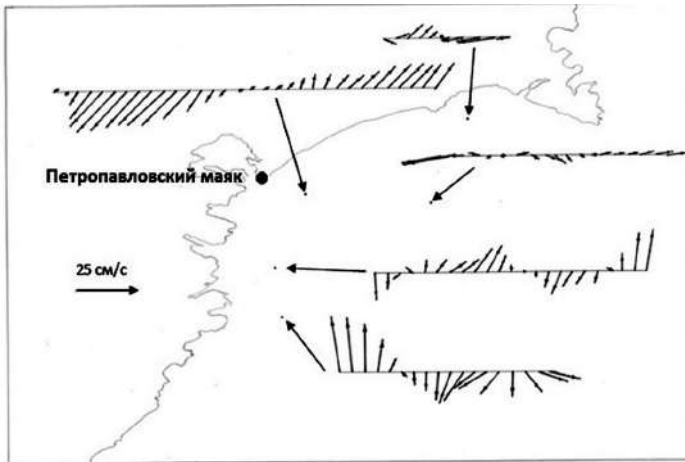


Рис. 8. Векторы скорости неперидических течений с дискретностью 6 часов

Неперидические течения на каждой гидрологической станции имеют различные скорости и разнообразные направления, но в большинстве случаев ориентированы вдоль береговой черты (рис. 8). Близкие направления течений сохраняются в течение одних-трех суток, что в основном соответствует времени перемещения барических образований через исследуемый район. Направление поверхностных течений не всегда согласуется с направлением ветра на береговых гидрометеостанциях. Нельзя исключать, что это происходит в результате искажения ветрового режима на побережье из-за орографии. Тем не менее, факторы, вызывающие указанный эффект, могут быть весьма разнообразны: изменения градиентов приземного атмосферного давления, влияние рельефа дна и конфигурации береговой черты, наличие вихревых структур и т. д. Представляется, что для поиска ответа о причинах данного явления необходимы дополнительные исследования, включающие численное моделирование динамики вод.

Выводы

Особенностью режима поверхностных суммарных течений вблизи тихоокеанского побережья полуострова Камчатка является уменьшение их скоростей от материкового склона к берегу. В основном это вызвано тем, что в мористой части района проходит Камчатское течение. В Камчатском, Кроноцком и Авачинском заливах скорости суммарных течений уменьшаются. Характерной чертой исследуемого района является его значительная вихревая активность. Практически постоянно присутствуют мезомасштабные антициклонические вихри, перемещающиеся в юго-западном направлении, которые могут делиться на более мелкие структуры.

Только для отдельных станций в спектрах компонент течений выявляются суточные и полусуточные приливы, что, вероятно, является следствием недостаточно высокого качества наблюдений. При этом на некоторых станциях хорошо выражены инерционные течения, обычно возникающие после прохождения над морем циклонов.

Характеристики приливных течений в основном определяются морфометрией исследуемого района. В прибрежной зоне большие оси эллипсов волн M2 и K1 главным образом ориентированы вдоль береговой черты, вблизи пролива между Авачинским заливом и Авачинской губой заметен поворот этих осей в направлении, соответствующем ориентации пролива. Поляризация эллипсов приливных волн различна, но доминирует вращение векторов течений по часовой стрелке. Приливные течения могут быть как реверсивными, так и круговыми. Степень сжатия приливных эллипсов волны K1 изменяется в меньших пределах по сравнению с волной M2, что может быть следствием меньшего влияния бароклинности на суточные субинерционные течения.

Значительной величины (25–30 см/с) достигают скорости неперiodических течений. Можно ожидать, что в экстраординарных штормовых условиях они могут существенно превышать скорости постоянных и приливных течений.

Литература

1. Власова Г.А., Васильев А.С., Шевченко Г.В. Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря // М.: Наука, 2008. – 359 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том X. Берингово море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия // СПб.: Гидрометеиздат, 1999. – 300 с.
3. Думанская И.О., Зеленько А.А., Мысленков С.А., Нестеров Е.С., Попов С.К., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Морские гидрологические прогнозы и оперативная океанология в Гидрометцентре России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 4 (374). – С. 149–183.
4. Ковалев П.Д., Шевченко Г.В. Оценка характеристик морских течений на Пильтун-Астохской нефтегазоносной площади (северо-восточный шельф острова Сахалин) // Экспериментальные исследования длинноволновых процессов на северо-западном шельфе Тихого океана. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – С. 173–187.
5. Ковалев П.Д., Шевченко Г.В. Экспериментальные исследования длинноволновых процессов на северо-западном шельфе Тихого океана // Владивосток: Дальнаука, 2008. – 216 с.
6. Королев Ю. П., Шевченко Г.В. Особенности распространения волн цунами в районе Петропавловска-Камчатского // Вулканология и сейсмология. – 2003. – № 6. – С. 62–70.
7. Путов В.Ф., Шевченко Г.В. Анализ инструментальных измерений течений на шельфе северо-западной части Охотского моря // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов, Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. – 2001. – С. 36–47.
8. Рабинович А.Б. Топографические вихри в районе Курило-Камчатского желоба // Докл. АН СССР, 1984. – Т. 277. – № 4. – С. 976–979.
9. Рогачёв К.А., Горин И.И. Перенос массы и долговременная эволюция вихрей Камчатского течения // Океанология. – 2004. – Т. 44. – № 1. – С. 19–25.
10. Рогачёв К.А., Шлык Н.В. Характеристики вихрей Камчатского течения // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 6. – С. 70–79.
11. 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.

12. Романов А.А., Шевченко Г.В., Цой А. Идентификация мезомасштабных вихревых структур на юго-восточном шельфе Камчатки по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 5. – С. 80–89.

13. Хен Г. В., Заочный А.Н. Изменчивость расхода Камчатского течения и океанологических параметров в Камчатском проливе // Известия ТИНРО. – 2009. – Т. 158. – С. 247–260.

14. Храпченков Ф.Ф. Исследование вихрей у побережья Камчатки летом 1985 г. // Океанология. – 1987. – Т. 27. – № 3. – С. 391–396.

15. Храпченков Ф.Ф. Структура Камчатского течения и его особенности // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 3. – С. 70–77.

16. Яричин В.Г., Власов Н.А. Марьина Е.Н., Гришина М.А. Роль физико-географических факторов в кинематике приливных течений, обусловленных суточными волнами в шельфовой зоне острова Сахалин // Юбилейный вып. ДВНИГМИ – 65 лет. – Владивосток: Дальнаука, 2015. – С. 63–84.

17. Яричин В.Г., Власов Н.А. Олейников И.С., Шкилева А.А. Особенности пространственной изменчивости гармонических постоянных приливных течений суточных волн на Северо-Восточном шельфе о. Сахалин (по материалам экологического мониторинга нефтегазоносных площадей) // Труды ДВНИГМИ. – 2012. – Вып. 154. – С. 145–186.

18. Emery W. J., Thomson R.E. Data Analysis Methods in Physical Oceanology // Third Edition. Elsevier, New York: 2014. – 716 p.

19. Foreman M. G.G. Manual for Tidal Currents Analysis and Prediction // Pacific Marine Science Report 78–6, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, B.C.: 2004. – 57 p.

20. Parker B.B. Tidal Analysis and Prediction // NOAA Special Publication NOS CO-OPS3, 2007. – 378 p.

21. Rabinovich A. B., Krassovski M.V., Hannah C.G. M2 Tidal Currents in Douglas Channel: Analysis and Predictability // Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences 326, 2019. – 47 p.

22. Rabinovich A. B.; Hannah C.G.; Krassovski M.V. Tidal Currents in Douglas Channel, British Columbia: Evaluation and Prediction // Water, 2023. – Vol. 15, 2441. – 24 p.

23. Shevchenko G., Rabinovich A., Thomson R. Sea- ice drift on the northeastern shelf of Sakhalin Island // J. Phys. Oceanogr., 2004. – Vol. 34. – No. 11. – P. 2470–2491.

24. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/?v> (дата обращения 2024-06-30).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ МОРЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ РАЗЛИЧНЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Введение

Внедрение автоматизированных средств измерений в системе прибрежных наблюдений является актуальной задачей. Данное явление обусловлено широким использованием математических средств обработки и анализа данных, и вовлечение в этот процесс системы наблюдений во все большей степени становится необходимым условием дальнейшего развития гидрометеорологического обеспечения морской деятельности. Автоматизация морских береговых наблюдений должна позволить получить больший контроль над технологическим процессом, минимизировать ошибки, связанные с человеческим фактором, и в среднесрочной перспективе сократить трудовые и иные затраты [5].

Автоматизированные средства измерения уровня моря представляют собой качественно новый способ измерения и требуют оценки качества наблюдений, сравнимости с предыдущими данными наблюдений, выработки методических рекомендаций по организации и эксплуатации наблюдений, корректировке нормативной документации, определяющей порядок их работы. Имеется множество вопросов, связанных с выбором измерительного оборудования [4].

На Дальнем Востоке создана и в течение 14 лет эксплуатируется сеть автоматизированных постов (АП) измерения уровня моря службы предупреждения о цунами. В качестве измерителя уровня моря были взяты гидростатические датчики. Количество автоматизированных постов составляет 25. 9 из них установлены на гидрометеостанциях, где выполняются наблюдения за уровнем моря поплавковыми средствами измерения (СУМ). Имеется большой массив данных наблюдений гидростатическими датчиками, накоплен опыт их эксплуатации.

Ранее в ДВНИГМИ проводились исследования по оценке качества наблюдений, выполненных гидростатическими датчиками [1, 2]. Анализ качества данных проводился на основе наблюдений от нескольких месяцев до 4 лет на 13 АП. Был сделан вывод о невозможности использования данных АП для решения ряда задач. Были предложены решения для повышения качества данных наблюдений гидростатических датчиков, которые в целом актуальны и в настоящее время.

Цель настоящих исследований – проведение совместного анализа наблюдений за уровнем моря на морских прибрежных станциях гидростатическими и поплавковыми средствами измерений на основе накопленного массива данных, оценки качества наблюдений гидростатическими датчиками. Ставилась задача определить степень сходства и различий между данными гидростатических датчиков и СУМ, попытаться выявить факторы в работе гидростатических датчиков, при которых эти различия значительны.

Необходимо отметить, что на автоматизированных постах в первые годы устанавливались датчики Aanderaa 3791a, позже стали устанавливать датчики МК-26-4 и датчики SEBA DS-22. Датчики фиксировали наблюдения за каждую минуту, причем первые два типа датчиков отмечали средние за минуту значения, датчик производства SEBA – мгновенные значения на время, кратное минуте.

Так как данные СУМ после обработки представляются в виде часовых значений, данные гидростатических датчиков также необходимо было привести к значениям с часовой дискретностью. Данная задача, как и в работах [1, 2, 3], решалась на основе фильтрации высокочастотных колебаний, под которыми, в данном случае, понимались сейши, имеющие частоту порядка от 20 минут до одного часа. Следует отметить, что при использовании фильтров, например, Барлетта или Тьюки, при приближении к концам рядов уменьшается интервал сглаживания. Вследствие этого наблюдаются колебания в данных, зависящих от размеров сейши на данный период. В рамках настоящих исследований было решено сглаживание проводить на основе метода наименьших квадратов при аппроксимации данных квадратичной функцией. Данный подход в меньшей степени уменьшает максимумы в изменениях уровня моря. Также лучше осуществляет сглаживание на границах участков с данными при уменьшении размаха сглаживания.

Результаты и обсуждение

Оценки качества сглаживания, его степень приближения к данным СУМ осуществлялись по данным ГМС Владивосток. Практически все время на этой гидрометеостанции расчеты режимных характеристик осуществлялись не по данным СУМ, а по данным гидростатического датчика, причем данные обрабатывались так же, как и при обработке лент СУМ: строились графики, и вручную проводилась огибающая кривая, с которой снимались значения уровня за каждый час [6]. Таким образом, мы фактически оценивали степень различия сглаживания «вручную», по методике обработки лент СУМ и на основе программных средств. Анализ характера изменчивости данных уровня моря с дискретностью 1 минута показал, что в целом сейши имеют изменчивость в пределах 10 см. Период их составляет 20–30 минут. Однако в отдельные периоды они могут возрастать до 50 см. Период этих колебаний может достигать одного часа. Оценки степени сглаживания проводились для этих периодов и по данным за год. При небольших сейшах различия между сглаженными данными и данными, обработанными вручную (аналог СУМ), незначительны, а для больших различия могут достигать 4 см и обусловлены также и неоднозначностью проведения огибающей кривой вручную и вполне допустимы. На основе численных экспериментов был принят размах сглаживания 301 минута, который позволяет несколько уменьшить степень различий при больших сейшах.

Как видно из данных, представленных в табл. 1, при больших сейшах величина среднеквадратического отклонения может достигать 1,66 см, а средняя по абсолютной величине – 1,25 см. За счет того, что такие случаи достаточно редки, в среднем за год они дают небольшое увеличение в численных значениях

Таблица 1. Статистические оценки различий между сглаженными данными и данными, обработанными вручную (аналог СУМ)

	Малые сейши	Большие сейши	За год (сглаживание)	За год (без сглаживания)
Ср. квадр. откл. (см)	0,33	1,66	0,41	1,12
Средн. по абс. вел. (см)	0,27	1,25	0,31	0,71
Мин. отклонение (см)	-0,68	-4,58	-5,51	-13
Макс. отклонение (см)	0,82	1,41	4,65	7
% данных в интервале ± 1 см	100	44	99	68
% данных в интервале ± 2 см	100	88	100	94

различий: с 0,33 до 0,41 для среднеквадратического отклонения и с 0,27 до 0,31 для средних по абсолютной величине значений.

Ориентиром для оценки степени сходства служит РД «Методика сравнительного анализа данных морских гидрологических наблюдений, получаемых автоматизированными и классическими средствами измерений в различных климатических зонах» (РД 52.10.892-2020) [7]. В данном документе приводятся критерии сравнительных наблюдений. Для уровня моря они составляют: по числу пропусков – не более 5 %, по величине среднеквадратического отклонения разницы между наблюдениями датчиком и классическими наблюдениями – 2,5 см, среднеарифметического значения по абсолютной величине – 2 см. Приведенные в табл. 1 статистические характеристики для данных без сглаживания входят в эти пределы, тем не менее процедура сглаживания более чем в 2 раза уменьшает степень различий. Таким образом, используемый алгоритм приведения минутных данных гидростатического датчика к значениям с часовой дискретностью удовлетворительно решает задачу фильтрации высокочастотных колебаний уровня моря.

Как уже отмечалось, на 9 гидрометеостанциях наблюдения за уровнем моря проводились и СУМ и гидростатическим датчиком. Более детально рассмотрены результаты сравнения на ГМС Находка за период с 2011 по 2018 гг., где показатели различий наилучшие. В этот период был установлен гидростатический датчик Aanderaa 3791a. Установка датчика произведена 18 октября 2010 года, его замена на новый – 26 января 2017 г. За этот период несколько раз проводилась нивелировка морского поста, однако сведений о привязке гидростатического датчика не имеется. Для большей наглядности по данным начального периода 2010 года осуществлена привязка данных гидростатического датчика к данным СУМ. На рис. 1 показаны величины разницы данных СУМ и гидростатического датчика за 2010–2018 гг.

Обращает на себя внимание относительно небольшие изменения разницы в данных в начальные периоды после установки датчика. Так, за период с 15 ноября 2010 г. до 31 марта 2012 г. величина среднеквадратического отклонения составила 0,88 см, средняя по абсолютной величине – 0,7 см, 97,7 процентов данных

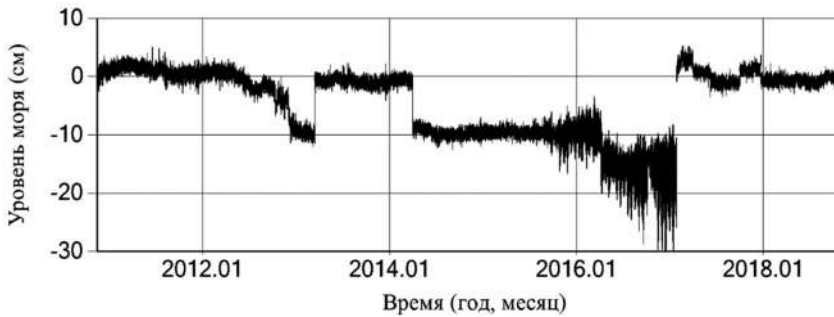


Рис. 1. Величины разницы данных СУМ и гидростатического датчика на ГМС Находка за 2010–2018 гг.

находятся в пределах ± 2 см. После замены датчика в январе 2017 года также наблюдаются относительно небольшие изменения разницы в данных. При более детальном рассмотрении данных за этот период (рис. 2) видны относительно однородные периоды, разница между которыми составляет порядка 2–4 см. Одной из возможных причин данных различий, на наш взгляд, может являться некорректная установка датчика после профилактического осмотра. Для однородного периода (2018 год) величина среднеквадратического отклонения составила 0,64 см, средняя по абсолютной величине – 0,51 см, в пределах 2 см попадают 99,85 процентов данных.

По данным первого датчика, начиная примерно с апреля 2012 г. до января 2013 г., наблюдаются трендовые изменения примерно на 10 см, а затем стабилизация разницы между гидростатическим датчиком и СУМ.

Наблюдающееся в период с 14 марта по 1 апреля 2013 г. резкое изменение разницы примерно на 10 см, как и в 2017 г., наиболее вероятно также связано с подъемом датчика и последующей его установкой на другой уровень, но нельзя исключать и спонтанного изменения в регистрации уровня гидростатическим датчиком. Визуальный анализ данных уровня моря гидростатическим датчиком не позволил выявить эти смещения. Начиная с августа 2015 г. достаточно заметным становится увеличение амплитуды разницы, превышающей 10 см перед заменой датчика на новый.

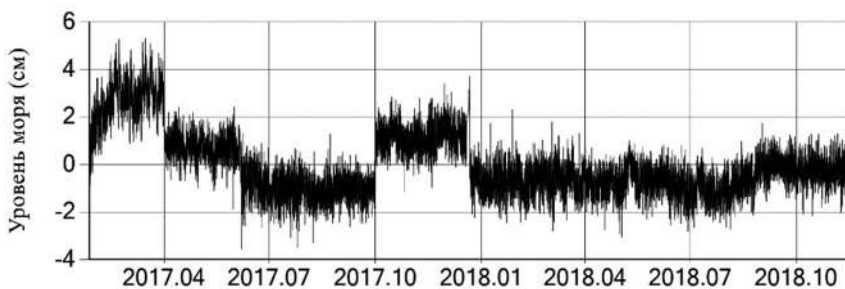


Рис. 2. Величины разницы данных СУМ и гидростатического датчика на ГМС Находка за период с января 2017 по декабрь 2018 г.

Это было обусловлено сдвигом по фазе в ходе изменений уровня моря СУМ и датчика относительно друг друга, который к концу года достиг одного часа.

Определенный интерес представляют данные на ГМС Холмск. На рис. 3 показана временная изменчивость данных гидростатических датчиков за период с 2010 по 2022 год. Датчик МК-26-4, установленный в марте 2016 г., удовлетворительно проработав более 2 лет, стал показывать все более увеличивающиеся значения в период с декабря 2018 г. по август 2020 г., до его замены на новый.

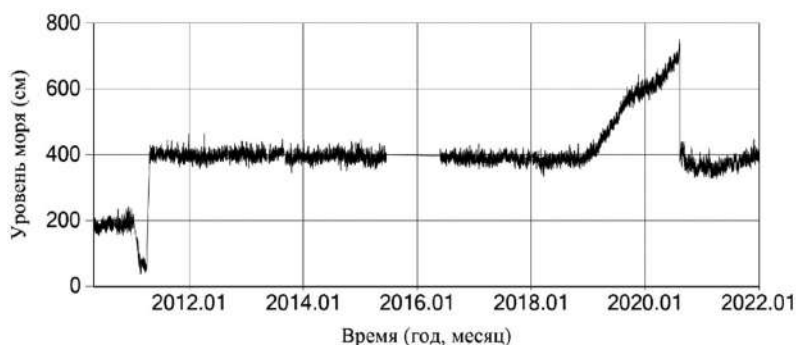


Рис. 3. Данные уровня моря, измеренные гидростатическим датчиком на ГМС Холмск за период 2010–2021 гг.

В табл. 2 представлены сведения об установке новых датчиков и статистические характеристики разниц между данными СУМ и гидростатических датчиков за относительно однородные периоды их изменчивости. Как видно, статистические характеристики выше значений по данным гидрометеостанции Находка.

Следует отметить, что при рассмотрении данных СУМ и гидростатических датчиков использовались не исходные данные наблюдений, а данные, полученные после их преобразования, а именно – после их сглаживания: субъективного при обработке лент СУМ и формализованного – при приведении данных гидростатических датчиков к часовому интервалу. В 2018 г. в Приморском УГМС

Таблица 2. Даты установки новых датчиков и статистические оценки различий между данными СУМ и гидростатических датчиков на ГМС Холмск

Дата установки	Марка датчика	Период расчета статистических характеристик	Среднеквадратическое отклонение (см)	Среднее по абсолютной величине (см)	% данных в интервале $\pm 2\text{см}$
15.04.2010	Aanderaa 3791a	15.04. 2011 – 2.09. 2013 гг.	3.65	2.04	59
02.09.2013	МК-26-4	2.02. 2013 – 1.09. 2013гг	2.09	1.63	69
10.10.2014	МК-26-4	10.10. 2014 – 10.06. 2015 гг.	2.13	1.6	71
21.03.2016	МК-26-4	26.05.2016 – 31.12.2018	1.88	1.48	74
12.08.2020	МК-26-4				

в инициативном порядке главным специалистом Центра цунами Д.Р. Шпачуком на посту Владивосток (в мареографном колодце) были установлены несколько датчиков: Aanderaa 3791a, Seba поплавковый, Seba-DS22 (гидростатический датчик), МК-26-4. Уникальность этих данных заключается в том, что появилась возможность сравнивать наблюдаемые данные.

В табл. 3 представлены статистические характеристики разницы между данными Seba поплавкового и данными гидростатических датчиков, полученными за период с марта по декабрь 2018 г. Длина рядов минутных значений составила 440 тысяч.

Таблица 3. Статистические характеристики разницы в наблюдениях, выполненных различными средствами измерений

Сравниваемые датчики		Среднеквадратическое отклонение (см)	Среднее по абсолютной величине (см)	Трендовые изменения (см)	% данных в интервале ± 1 см	% в данных в интервале ± 2 см
Seba поплавковый	Aanderaa 3791a	0,77	0.62	-1,35	77,99	99,02
	Seba-DS22	0,61	0,48	-0,19	90,05	99,82
	МК-26-4	0,61	0,48	-1,19	89,66	99,86

Анализ наблюдений датчиками разных производителей показал, что различия между сравниваемыми датчиками не превышают 1 см как по величине среднеквадратического отклонения, так и по значениям среднего по абсолютной величине. При этом надо обратить внимание на работу датчика МК-26-4. Несмотря на то, что заявленная погрешность составляет 7 см, статистические оценки разницы с данными поплавкового датчика близки к значениям других датчиков. Также следует отметить, что датчики производства Seba показывают мгновенные значения уровня моря, тогда как Aanderaa 3791a и МК-26-4 – данные, осредненные за одну минуту. Сглаживание в изменении уровня моря в мареографном колодце привело к тому, что различия с показаниями других датчиков не видны.

Определенный интерес представляют трендовые изменения. Если предположить, что для поплавкового датчика в регистрации уровня моря трендовые составляющие отсутствуют, то можно говорить о проявлении трендовых составляющих в регистрации уровня моря для гидростатических датчиков в пределах 1,39 см для Aanderaa 3791a, 1,19 см – для МК-26-4 и 0,19 см – для Seba-DS22. Также следует отметить, что по информации, предоставленной Д.Р. Шпачуком, для датчиков Aanderaa 3791a и МК –26–4 продолжительность нормальной работы составила 1–2 года, для Seba-DS22–3 года.

Проведенные исследования следует рассматривать как предварительные. Обусловлено это прежде всего тем, что после опубликования работы [1, 2] значительного улучшения качества данных сети АП не произошло. Не производилась привязка датчиков после их профилактического осмотра или замены. Можно предположить, что не все случаи профилактического осмотра датчиков отмечались

в документах сопровождения работы АП. Возможно, в ряде случаев, неудовлетворительные результаты совместного анализа данных СУМ и гидростатического датчика обусловлены качеством данных СУМ. Тем не менее, полученные результаты позволяют сделать некоторые выводы и наметить пути дальнейшей работы в области автоматизации измерений уровня моря.

Рассматривая работу датчиков за длительный промежуток времени, видно, что устойчивая работа датчиков наблюдается в течение от одного года до трех лет, причем датчик Seba-DS22 имеет несколько лучшие показатели. Нарушения в работе датчиков проявляются в значительных трендовых изменениях, которые могут достигать до 3 метров. Трендовые изменения могут сопровождаться периодами стабилизации в показаниях датчика. Может проявляться и запаздывание в показаниях, что приводит к сдвигам в показаниях гидростатических датчиков. Вероятны и резкие сдвиги в показаниях датчиков. Скорее всего, форма нарушений в показаниях индивидуальна для каждого датчика.

Как уже отмечалось, результаты совместного анализа данных СУМ и гидростатического датчика на ГМС Находка были наилучшими. В начальном периоде работы датчиков статистические оценки различий не превышали допустимых. Такие же показатели наблюдались при сравнении данных цифрового поплавкового датчика и гидростатических датчиков разных производителей в первый год после их установки. Другими словами, данные гидростатических датчиков обеспечивают преимущество в наблюдениях за уровнем моря при переходе к автоматизированным средствам наблюдений.

Полученные результаты сравнительного анализа, характера их изменений со временем позволяют сделать заключение о необходимости постоянного контроля данных гидростатического датчика. Проблема заключается и в том, что трендовые изменения, связанные с ухудшением качества наблюдений, могут происходить постепенно и стать заметными через определенное время, то есть какое-то количество данных потребует отбраковки. Наилучшим решением данной задачи является установка дублирующего датчика. В этом случае появляется возможность автоматизации контроля данных уровня моря и недопущения пропусков при ухудшении качества измерений одним из них. Значительно реже можно проводить сравнение с показаниями мерной рейки.

Заключение

В заключение следует отметить, что на основе проведенных исследований по анализу сравнительных статистических оценок наблюдений гидростатическими датчиками и поплавковыми датчиками (СУМ и цифровой датчик) можно сделать следующие выводы:

1. данные гидростатических датчиков обеспечивают преимущество в наблюдениях за уровнем моря при переходе к автоматизированным средствам наблюдений;

2. эксплуатируемые гидростатические датчики обеспечивают заявленную точность наблюдений в течение 1–3 лет. В дальнейшем ухудшение качества

наблюдений может проявляться в виде трендовых изменений, запаздывания регистрации данных, резких изменений в показаниях уровня моря;

3. эксплуатация гидростатических датчиков должна сопровождаться постоянным контролем данных. Наилучшим решением данной задачи, на наш взгляд, является установка дублирующего датчика, что позволяет автоматизировать этот процесс, снизить процент отбракованных данных.

Вопросы, затронутые в рамках данной статьи, возможно и являются основными при переходе к автоматизированным средствам измерений, но не охватывают всю проблему в целом. Важными являются вопросы снижения пропусков в наблюдениях, которые непосредственно связаны с удаленностью размещения оборудования, климатическими условиями, степенью развитости инфраструктуры в районах наблюдений. На качество наблюдений также влияют уровень подготовки специалистов, определяющих уровень эксплуатации комплекса оборудования, конкретные способы установки оборудования, эксплуатационные затраты.

Литература

1. Любицкий Ю. В., Като Л.Н., Соломатина Л.Н. Оценка возможности расчета режимных характеристик уровня моря по данным наблюдений сети российской службы предупреждения о цунами // Юбилейный выпуск «ДВНИГМИ – 65 лет». – Владивосток: Дальнаука, 2015. – С. 33–51.

2. Любицкий, Ю. В., Манько А.Н., Соколов О.В. Перспективы использования данных измерений автоматизированных постов службы цунами для формирования многолетних массивов наблюдений над уровнем моря // Юбилейный выпуск «ДВНИГМИ – 65 лет». – Владивосток: Дальнаука, 2015. – С. 8–32.

3. Матушевский Г. В., Привальский В.Е. Фильтрация временных рядов в гидрометеорологии. // Океанология. – 1968. – Т. 8. – Вып. 3. – С. 502–513.

4. Остроумов Л. В., Остроумов М.В. К вопросу об автоматизации морских береговых гидрологических наблюдений // М.: Труды ГОИН. – 2021. – Вып. 222. – С. 185–197.

5. Остроумов Л. В., Остроумов М.В., Рогожников А.В. О перспективах развития морских береговых автоматизированных наблюдений // Санкт-Петербург: Типография АО Концерн «Моринформсистема-Агат». – № 1 (21), 2022. – С. 28–37.

6. РД 52.10.842-2017 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам // Вып. 9, ч. 1. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. – М.: ООО «Издательство ИТРК», 2017. – 375 с.

7. РД 52.10.892-2020 Методика сравнительного анализа данных морских гидрологических наблюдений, получаемых автоматизированными и классическими средствами измерений в различных климатических зонах // Ижевск: Типография ООО «Принт», 2020. – 42 с.

*А.Н. Манько, М.Г. Диденко, В.Н. Храмушин,
ФГБУ «ДВНИГМИ», г. Владивосток,
Сахалинское отделение Российского научно-технического
общества судостроителей им. А.Н. Крылова*

ОЦЕНКИ ЦУНАМИОПАСНОСТИ ПОБЕРЕЖЬЯ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Введение

Быстрое развитие современных вычислительных ресурсов и создание высокоточных батиметрических массивов предполагает необходимость совершенствования контроля опасных морских явлений как в плане долгосрочных режимных прогнозов, так и с целью заблаговременного предупреждения чрезвычайных ситуаций. Владивосток и ближайшие районы во всё большей степени застраиваются объектами промышленного, социального и жилого назначения. Оценка воздействия опасных морских явлений на береговую зону приобретает особое значение, так как многие из возводимых объектов находятся непосредственно у береговой черты. Цунами, хотя и очень редкое природное явление, характеризуется значительными разрушительными последствиями. По историческим данным, на побережье залива Петра Великого не наблюдались цунами с катастрофическими последствиями, тем не менее, от этого задача оценки возможных величин волн цунами не становится менее актуальной.

Имеются многочисленные работы, посвященные исследованию цунами в Японском море с использованием прямого численного моделирования [3, 6 и др.]. Район залива Петра Великого в этих исследованиях рассматривался наряду с другими районами побережья Приморского края.

В рамках настоящих исследований анализируются результаты вычислительных экспериментов по моделированию цунами в заливе Петра Великого, вызванных сейсмическими очагами подводных землетрясений в различных районах цунамигенной зоны в Японском море, расположенной вдоль побережья Японии.

Краткое описание используемой модели и задаваемых параметров при проведении вычислительных экспериментов

Вычислительные эксперименты проводились с использованием лицензионного программного обеспечения лаборатории вычислительной гидромеханики и морских исследований Сахалинского государственного университета, представляемого и поддерживаемого авторами для проведения научных исследований [10–13]. В основу программного комплекса положены уравнения длинных волн. При допущениях малости конвективных эффектов эти уравнения идентичны гиперболическим уравнениям второго порядка и не включают механизмы трансформации вихревых течений [6]. В случае приведения всех моделируемых полей к гладким дифференцируемым функциям, а именно к рассмотрению градиентов изменения уровня моря и дивергенции полных потоков, вычислительная модель

будет более соответствовать определению прямого вычислительного эксперимента на недифференцируемых распределениях весовых функций – сложном рельефе морского дна.

В программном комплексе ANI реализована схема выделения элементарного вычислительного объекта в дискретном разбиении пространственного поля с двойным пространственным дифференцированием (как линейной аппроксимации физических полей), моделирующих уравнения движения второго порядка (рис. 1). Дифференциальные (разностные) операции на сеточных узлах соотносятся с центрами масс пространственных ячеек, чтобы в последующих аппроксимациях восстанавливалось состояние моделируемой сплошной среды в исходных сеточных узлах с учетом кинематических смещений условно независимых частиц жидкости.

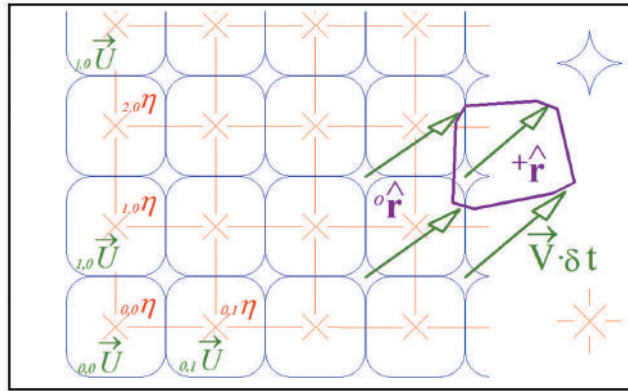


Рис. 1. Схема выделения элементарного вычислительного объекта, реализованная в программном комплексе ANI

В полном виде схема вычислительных процедур включает решение уравнений движения (рис. 2, I этап), учет конвективности (рис. 2, II этап) и выполнение условия неразрывности (рис. 2, III этап). Длинноволновые вычисления допускают возможность пропуска конвективного этапа в случае малости высоты волны цунами по отношению к глубине моря. Практическое использование вычислительного эксперимента ограничивается двумя этапами вычислений: I – моделирование кинематики свободных частиц жидкости; III – изменение уровня моря компенсирует накопление внутренней кинетической энергии для этих же частиц. Постановка прямого вычислительного эксперимента изначально в конечных разностях приводит к приемлемому согласованию результатов расчета с практическими наблюдениями за моделируемыми природными явлениями, что делает актуальным изучение математических моделей именно в такой физической постановке.

I этап	→	$\delta \vec{U} = g H \cdot \frac{\partial \eta}{\partial \vec{r}} \delta t$	Уравнение движения (внешнее воздействие)
II этап	→	$\delta \vec{U} \cong \frac{\partial \vec{V}}{\partial \vec{r}} \vec{V} \cdot H \delta t$	Конвективность (деформация и смещение)
III этап	→	$\delta \eta = \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial \vec{r}} \right) \delta t$	Условие неразрывности (захват энергии движения)

Рис. 2. Схема вычислительных процедур

В программном комплексе ANI [14] в исследовательских целях допускается включение в вычислительную модель этапа II, который, по сути, является интерполяционным оператором для учета малых, но конечных смещений моделируемых частиц жидкости. В общем случае данное включение переводит процесс моделирования к решению полной задачи гидромеханики, с учетом таких реологических свойств жидкости, как вязкость, упругость и сжимаемость. В задаче о цунами в такой постановке рассматриваются варианты моделирования волн «большой амплитуды», что требуется, например, при постановке задачи о моделировании плоского неразрушающегося наката на пологий берег.

Прямой вычислительный эксперимент с использованием разделения физических решений по линейным пространственным аппроксимациям гладких неразрывных полей, задействованный в универсальном программном комплексе ANI для моделирования длинноволновых явлений в океане и вблизи побережья, дает возможность сквозной физической интерпретации всех вычислительных операций и эмпирических аппроксимаций возникновения цунами, что приводит к вполне адекватным результатам моделирования в сопоставлении с наблюдениями реальной гидромеханики океана. Это подтверждается многочисленными исследованиями [1, 6, 9, 15, 16 и др.].

Важнейшей задачей при моделировании цунами является способ задания очага цунамиопасного землетрясения. В рассматриваемом программном комплексе реализована гидродинамическая модель очага цунами, которая основана на макросейсмических аппроксимациях параметров подводного землетрясения. Модель характеризуется реализацией гидродинамического отклика на кратковременные и интенсивные сейсмические сотрясения морского дна, приводящие к оползневым явлениям и дисперсионным эффектам трансформации длинных волн в акваториях с высокочастотными осцилляторами собственных колебаний уровня моря. Таким образом, строго определяются геометрические построения и устанавливаются начальные параметры движения волн цунами:

- главные оси эллиптической деформации поверхности моря ориентируются по направлениям преобладающих изобат и берегового уреза;

- в зависимости от крутизны наклона морского дна, в мористой зоне сейсмического очага устраивается фронт волны цунами с подъемом уровня моря, по макросейсмическим оценкам, переходящим в отрицательную полуфазу волны, с опусканием уровня ближе к побережью до 25–30 % от величины фронта на глубокой воде;

- на наклонном дне положительной и отрицательной полуфазам волн цунами придается начальный импульс движения в направлении меньших глубин, для чего очаг инициируется векторным полем до 30–40 % от полного потока прогрессивной волны;

- на ровном дне подъем уровня стационарный, начальной скорости движения фронта не доопределяется [11].

При проведении вычислительных экспериментов очаги цунами задавались с использованием рассмотренной вычислительной модели [11], которые

автоматически формируются в программном комплексе ANI [16]. Размеры очага составляли 205 на 80 км по осям эллипса, высота – 1 м. Направленность определялась таким образом, чтобы воздействие волны цунами на залив Петра Великого было наибольшим.

При расчетах за основу была взята батиметрия, сформированная для побережья Приморского края, с шагом сетки 300 м [4, 14], а для залива Петра Великого использована батиметрия, рассчитанная компанией TCarta Varine, LLC (<https://www.tcarta.com/>) с разрешением менее 50 м. Общий массив батиметрии был сведен по исходным батиметрическим материалам к шагу расчетной сетки в 150 м. Данный масштаб обеспечивал достаточную детализацию особенностей береговой черты залива Петра Великого.

Для оценки степени сходства результатов расчета с данными реальных цунами были взяты результаты численного эксперимента для цунами, произошедшее 26 мая 1983 года, и данные исследований Поляковой, проведенных после цунами на основе опроса очевидцев и анализа следов цунами [7,8]. Для случая, когда наблюдались волны цунами до 1,5 м, результаты численного моделирования хорошо совпадали с данными наблюдений: 1,0 и 1,1 м соответственно. Для заплесков, превышающих 1,5 м, величины численных экспериментов дают более низкие значения высот волн цунами: 1,3 и 3,1 м соответственно. Это различие объясняется тем, что высокие значения заплеска, как правило, наблюдались в местах с обрывистыми берегами, тогда как результаты модели дают величину волны у берега. Таким образом, данная модель показывает вполне адекватные результаты в сопоставлении с наблюдениями.

Для оценки результатов численных экспериментов в программном комплексе ANI предусмотрена возможность записи характеристик волны для заданных точек (пунктов), которые в дальнейшем, по аналогии с мареографами, в статье называются «виртуальными мареографами», или «мареографами». Для оценки результатов расчетов вдоль всего побережья залива Петра Великого были расставлены виртуальные мареографы, всего 178 мареографов. Для сжатия информации данные мареографов осреднялись для выбранных 12 районов вдоль побережья залива Петра Великого, а также для всей области залива. Кроме того, были расставлены мареографы вдоль четырех разрезов, один из которых был задан в глубоководной части моря перед материковым склоном, остальные – в шельфовой зоне залива Петра Великого (рис. 3). Анализировались амплитуды (высоты) волн цунами, равные сумме максимальных положительных и отрицательных составляющих волны.

Результаты численных экспериментов и их анализ

Особенностью Японского моря является то, что цунами, эпицентры которых расположены в открытых частях Тихого океана, проникают в море в виде слабых волн и не представляют интереса с точки зрения оценки цунамиопасности побережья Приморского края. В Японском море имеется зона мелкофокусных землетрясений, способных генерировать цунами, которая располагается на шельфе

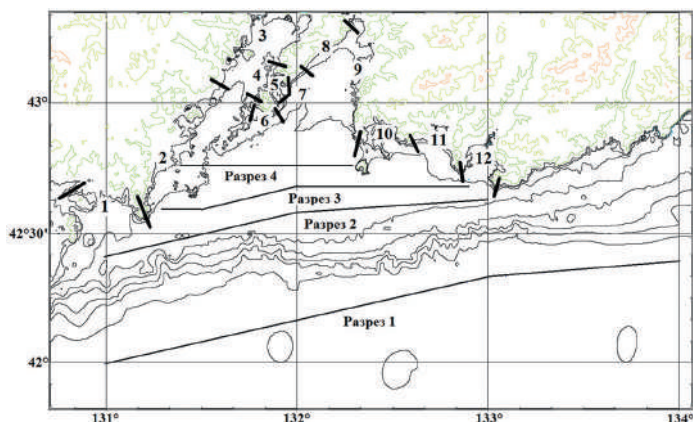


Рис. 3. Разрезы, вдоль которых были расставлены мареографы, и районы на побережье залива Петра Великого, для которых данные мареографов осреднялись

и подводном склоне глубоководной котловины вдоль западных побережий островов Сахалин, Хоккайдо и Хонсю [5]. В настоящих исследованиях численные эксперименты проводились для очагов цунами, расположенных в зоне мелкофокусных землетрясений вдоль Японских островов.

Для выявления закономерностей изменений амплитуд волн цунами в зависимости от расположения очагов цунамиопасных землетрясений предварительно рассчитывались кинематические карты, которые строились с помощью кинематической модели, реализованной в программе ANI. Анализ распространения волновых фронтов и волновых лучей позволяет выявить участки побережья с наибольшей концентрацией волновой энергии, обусловливаемой фокусировкой фронта для первого вступления волны [6].

Анализ построенных карт распространения волновых лучей от эпицентров цунамиопасных землетрясений показал, что выявляется зона, где значительное влияние на деформацию фронта волны цунами и, соответственно, на форму волновых лучей оказывает возвышенность Ямато. Вследствие того, что фронт над возвышенностью замедляет свой ход, после прохода возвышенности справа и слева фронт несколько разряжается, распространяясь в область, где произошло отставание фронта. Таким образом, за возвышенностью образуется область сходимости волновых лучей, образуя зону увеличения волновой энергии. Так как за возвышенностью Ямато к северу расположена значительная по размерам глубоководная котловина, следует ожидать концентрации волновой энергии на довольно узком участке побережья, расположенном по линии эпицентр землетрясения – возвышенность (середина возвышенности) Ямато. Для залива Петра Великого концентрация волновой энергии будет наблюдаться в случае, когда эпицентр цунами находится в районе 38° с. ш., 136° в. д. у берегов Японских островов (рис. 4а).

При положении очагов к западу и к востоку от 136° в. д. наблюдается значительный изгиб волновых лучей, которые достигают района залива Петра Великого, то есть следует ожидать ослабления волновой энергии в заливе Петра Великого.

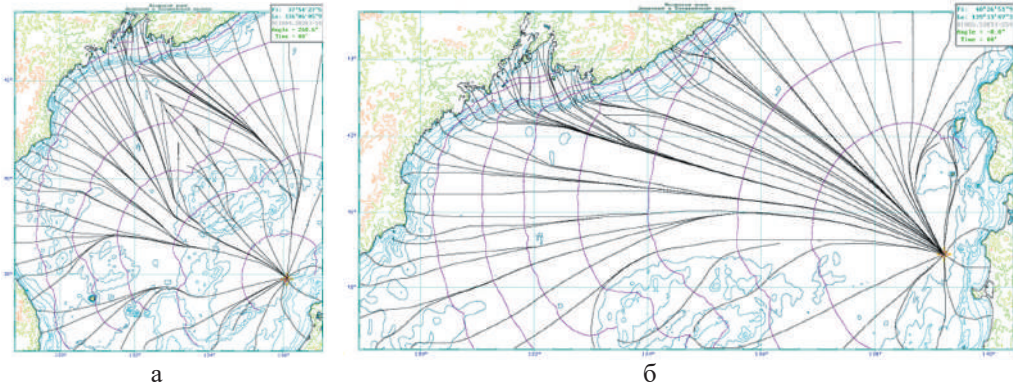


Рис. 4. Карта распространения волновых лучей и фронтальной зоны от эпицентра на 38° с. ш., 136° в. д. (а) и от эпицентра на 40° с. ш., 139° в. д. (б)

К северу вдоль цунамигенной зоны из района расположения очага примерно на 40° с. ш., 139° в. д. наблюдается минимальный изгиб лучей, направленных в сторону залива Петра Великого (рис. 4б). Севернее и южнее наблюдается ослабление волновой энергии, и, соответственно, следует ожидать уменьшение высот волн цунами от очагов землетрясений, расположенных в этих районах.

Выбор очагов для проведения численных экспериментов определялся результатами анализа карт распределения волновых лучей. Было выбрано 8 гипотетических очагов землетрясений, нумерация и координаты которых представлены в таблице и на рис. 5.

Эпицентры 3 и 7 соответствуют районам с возможными наибольшими величинами высот волн цунами в заливе Петра Великого. Следует отметить, что

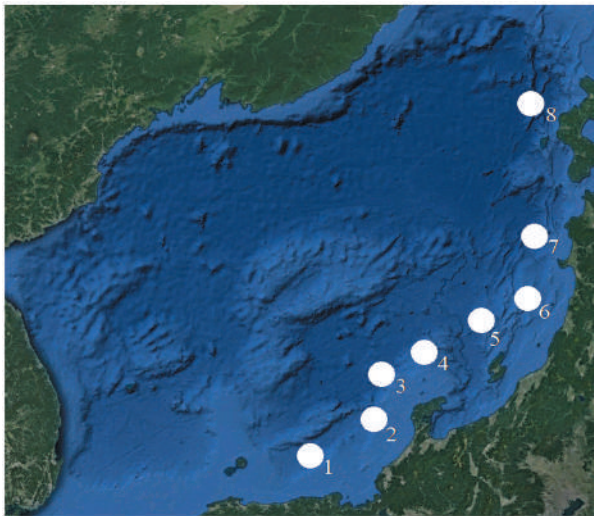


Рис. 5. Положение очагов землетрясений при проведении вычислительных экспериментов по моделированию цунами в Японском море

эпицентры 7 и 8 соответствуют эпицентрам землетрясений, вызвавшим цунами в 1983 и 1993 гг. соответственно.

Результаты численных экспериментов представлены в виде средних высот волн для всего залива Петра Великого (рис. 6). Как и следовало ожидать, максимальные амплитуды волн цунами в районе залива Петра Великого наблюдались от очага землетрясения 3, амплитуда волн цунами от очагов 2 и 4 значительно ниже. Данная зависимость служит подтверждением выводов, сформулированных при анализе карт распространения волновых лучей.

Таблица 1. Номера и координаты выбранных эпицентров землетрясений (с. ш., в. д.)

Номер эпицентра	1	2	3	4	5	6	7	8
Широта	36°26'	37°08'	37°54'	38°17'	38°52'	39°17'	40°26'	42°51'
Долгота	134°40'	135°58'	136°05'	136°55'	138°07'	139°06'	139°12'	139°12'

Достаточно протяженная глубоководная котловина после возвышенности Ямато приводит к фокусировке волновой энергии в районе залива Петра Великого. Небольшое смещение очага к востоку и западу приводит к тому, что зона концентрации волновой энергии смещается, соответственно, к западу и востоку, что обуславливает значительное уменьшение амплитуды волны в заливе.

Второй максимум наблюдался в районе очага 7, что также связано с особенностями рельефа дна Японского моря. От очагов, расположенных в данном районе, прохождение волн осуществляется вдоль глубоководной котловины без значительного рассеивания волновой энергии, вызванной неоднородностью рельефа дна. Для очага 6 отклонение распространения волны вызвано восточной окраиной возвышенности Ямато, а для очага 8 – влиянием берегового склона, которые

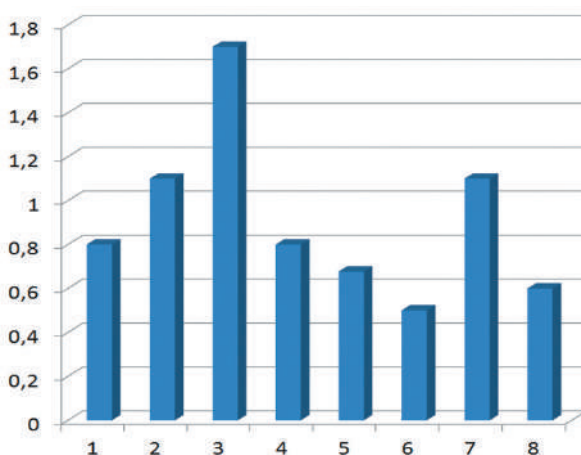


Рис. 6. Средние для залива Петра Великого амплитуды волн цунами по данным проведенных экспериментов для 8 очагов (м)

обуславливают деформацию волнового фронта и, соответственно, рассеивание волновой энергии, достигающей района залива Петра Великого.

Следует также отметить, что амплитуда волн цунами от очага 3 примерно в 1,5 раза больше амплитуды волн от очага 7, который соответствует положению очага цунами 1983 года.

Полученные закономерности подтверждают результаты численных экспериментов, проведенных ФГБУ «НПО «Тайфун» совместно с ИВТ СО РАН, ИВМ и МГ СО РАН [2]. По данным из [2] был выбран участок цунамиопасной зоны, соответствующий району проведенных в настоящих исследованиях экспериментов (рис. 7).

Для каждого из выбранных источников рассчитывались величины амплитуды волн цунами, равные сумме максимальных положительных и отрицательных составляющих волны, которые осреднялись по данным защищаемых пунктов в заливе Петра Великого – всего 10 пунктов. Графики строились для очагов, отмеченных на рисунке буквами а, b, с (рис. 8).

Обращает на себя внимание значительное различие величин амплитуд, полученных по результатам численных экспериментов в настоящих исследованиях и по данным ФГБУ «НПО «Тайфун» [2]. Различия обусловлены многими факторами, их анализ не входит в рамки настоящих исследований. Но их изменчивость вдоль цунамигенной зоны в целом совпадает с результатами проведенных нами экспериментов.

Следует также отметить, что превышение максимума амплитуды очага 3b по сравнению с очагом 6b, который наиболее близко расположен к очагу землетрясения, вызвавшего цунами в 1983 году, составляет 2,3 раза.

Для выявления закономерностей распространения волны цунами в шельфовой зоне залива Петра Великого был проведен анализ распределения амплитуды волны

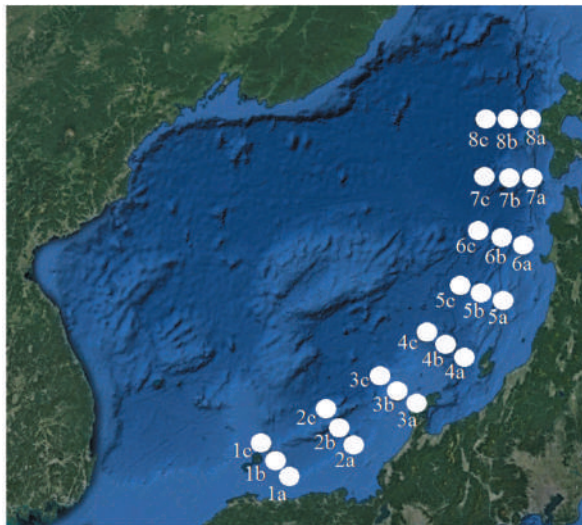


Рис. 7. Положение очагов цунамиопасных землетрясений цунами, заданных в [2]

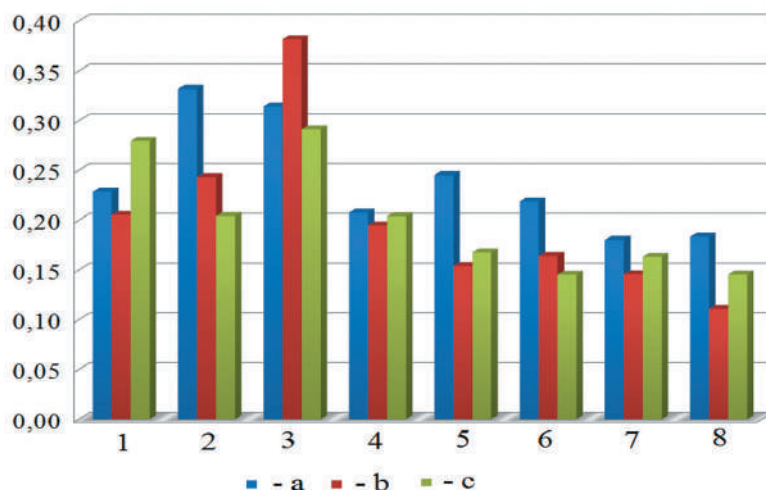


Рис. 8. Средние амплитуды волн цунами (м) для разных очагов для залива Петра Великого (по данным [2])

цунами перед материковым склоном (разрез 1, рис. 2) и на шельфе залива Петра Великого (разрезы 2–4, рис. 2).

Проведенный анализ распределения амплитуд по разрезам от очагов 3 и 7 показал, что в глубоководной части (разрез 1, рис. 9) при подходе волны от очага 3 величина амплитуды примерно в 2 раза выше, чем от очага 7. Величины амплитуд от очага 3 имеют слабовыраженный максимум в районе $132,4^\circ$ в. д. (рис. 9). При подходе волны от 7 очага отмечается понижение амплитуд вдоль разреза с востока на запад.

После прохождения материкового склона величины амплитуд возрастают примерно в два раза. Характер распределения амплитуд волн цунами вдоль разрезов меняется. Более четко эти изменения прослеживаются от эпицентра 3 и заключаются в следующем. В районе $131,7^\circ$ в. д. на всех разрезах в шельфовой зоне наблюдается минимум амплитуд. Можно говорить и о минимуме в районе $132,6^\circ$ в. д. На рис. 2 видно, что в этих местах материкового склона наблюдаются ложбины.

Соответственно, после прохождения материкового склона образуется зона расхождения волновых лучей, а справа и слева наблюдаются зоны их сходимости, что приводит к возрастанию амплитуд волн цунами по сравнению с соседними районами. Для эпицентра 7 подобная закономерность также прослеживается, хотя и менее четко выражена. Сходные закономерности распространения волн цунами наблюдаются и по данным экспериментов, проведенных от других очагов.

Таким образом, вследствие того, что рельеф дна залива Петра Великого характеризуется развитым мелководьем и крутым материковым склоном, изрезанным подводными ложбинами (каньонами), при прохождении волн цунами могут наблюдаться зоны разрежения и концентрации волновой энергии, которые могут быть достаточно сильно выраженными и наблюдаться в том или ином районе.

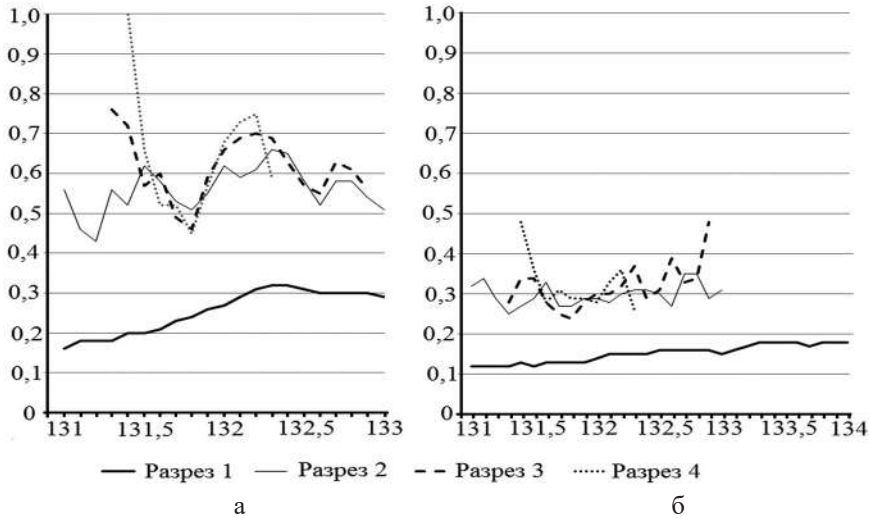


Рис. 9. Распределение амплитуд волн цунами по разрезам от очага 3 (а) и очага 7 (б).
Величина амплитуд (вертикальная ось) дана в метрах

Анализ изменчивости амплитуд волн цунами на побережье залива Петра Великого проводился для выделенных 12 районов, границы и номера которых показаны на рис 2. Расчеты амплитуды волн цунами по районам проводился для всех очагов. На рис. 10 представлены величины амплитуд для очагов 3 и 7, которые в целом отражают изменчивость от района к району для остальных очагов.

Как видно из графика, амплитуды волн цунами по всем районам от очага 3 выше, чем от очага 7.

Обращает на себя внимание минимум величин амплитуд волн цунами для района 3 и 4, которые соответствуют средней и северной частям Амурского залива. Это объясняется несколькими факторами, среди которых: ослабление волновой

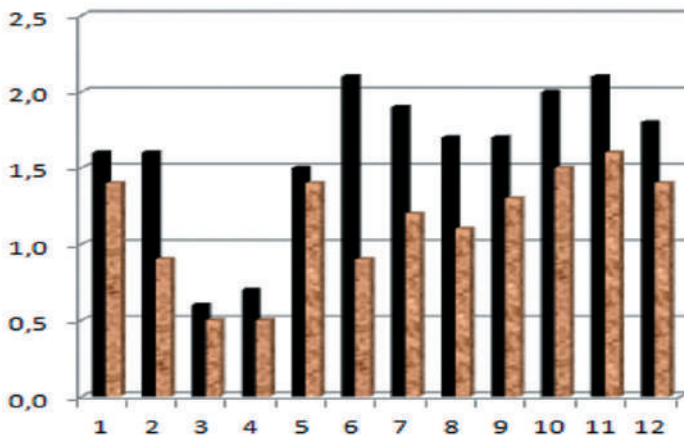


Рис. 10. Амплитуда волн цунами по районам (м). Черный цвет – для очага 3, серый – для очага 7

энергии после прохождения ложбины на материковом склоне в районе $131,7^\circ$ в. д., достаточно узкий вход в Амурский залив и большая протяженность хода волны цунами в заливе, небольшие глубины Амурского залива.

Рассматривая изменения амплитуд волн от района к району для 3 и 7 очагов, можно отметить следующее. Например, для районов 6–9: это южная часть о. Русский (район 6), южная и северная части западного побережья Уссурийского залива (7 и 8 районы) и восточная часть Уссурийского залива (район 9). По данным от очага 3 видно, что для южной части острова Русский наблюдаются максимальные амплитуды, к северу они уменьшаются, причем для районов 8 и 9 они примерно одинаковы. По данным от очага 7 максимальное значение амплитуд наблюдается для восточной части Уссурийского залива. В южной части острова Русский – наименьшие величины, то есть наблюдается обратная тенденция. По данным от остальных очагов также наблюдается различный характер изменения амплитуд волн цунами от района к району. Различия амплитуд от района к району не столь значимы по сравнению с амплитудой в Амурском заливе. Данный факт, как уже отмечалось, обусловлен наличием ложбин (каньонов) в материковом склоне и достаточно большой протяженностью шельфовой зоны.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что особенности рельефа дна Японского моря в довольно существенной степени влияют на величину амплитуд волн цунами в районе залива Петра Великого.

Максимальная амплитуда волн наблюдается для очага, расположенного в районе 136° в. д., что обусловлено концентрацией волновой энергии за возвышенностью Ямато.

Второй максимум, который в полтора–два раза меньше основного, отмечается для эпицентров, расположенных в районе северной части острова Хонсю (139° в. д., 40° с. ш.). Для этого района распространение волн в направлении залива Петра Великого проходит прямолинейно над глубоководной частью котловины, рассеивание энергии, вызванное неоднородностью рельефа дна, минимально. Второй максимум соответствует положению эпицентра цунами 1983 года. Следовательно, в случае возникновения землетрясения в районе 136° в. д. с магнитудой порядка 7,7–7,8, волны цунами на побережье залива Петра Великого могут быть примерно в полтора–два раза больше по сравнению с цунами 1983 года.

Установлено, что ложбины (каньоны) материкового склона оказывают влияние на распространение волн цунами в заливе Петра Великого. Наблюдается ослабление волновой энергии в одних районах побережья залива и усиление в других. В зависимости от положения очага цунами эти районы могут смещаться.

В Амурском заливе по данным численных экспериментов отмечаются минимальные значения амплитуды волны цунами по сравнению с другими районами залива Петра Великого. Одним из факторов уменьшения амплитуды волн цунами, достигающих Амурского залива, является ослабление волновой энергии после прохождения ложбины на материковом склоне в районе $131,7^\circ$ в. д.

Литература

1. Иващенко А. И., Гусяков В.К., Храмушин В.Н., и др. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. // ДАН. – 1996. – Т. 348. – № 4. – С. 532–538.
2. Косых В.С., Чубаров Л.Б. Гусяков В.К., Камаев Д.А., Григорьева В.М., Бейзель С.А. Методика расчета максимальных высот волн цунами в защищаемых пунктах побережья Дальнего Востока Российской Федерации. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов // ИНГГ СО РАН. – 2013. – № 40. – С. 115–134.
3. Куркин А.А. Пелиновский Е.Н., Чой Б.Х., Ли Д.С. Сравнительная оценка цунамиопасности япономорского побережья России на основе численного моделирования // Океанология. – 2004. – Т. 4. – № 2. – С. 179–188.
4. Минервин И. Г., Храмушин В.Н. «Батиметрия» – Цифровые батиметрические массивы (Охотское море) // СахГУ, Роспатент № 2010620626 от 22 октября 2010 г.
5. Наумов С. Б, Терехов А.И. Цунамиопасные землетрясения в Японском море // Сборник трудов конференции «Четырнадцатая уральская молодежная научная школа по геофизике». – Пермь, 18–22 марта 2013 года. – С. 195–199.
6. Поплавский А. А., Храмушин В.Н., Непоп К.И., Королев Ю.П. Оперативный прогноз наводнений на морских берегах Дальнего Востока России // Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. – 272 с.
7. Полякова А.М. Опасные и особо опасные гидрометеорологические явления в северной части Тихого океана и цунами у побережья Приморья // Владивосток, Дальнаука, 2012. – 181 с.
8. Полякова А.М. Цунами в Приморье 26 мая 1983 года и его последствия // Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 1988. – 40 с.
9. Савельев В. Ю., Храмушин В.Н. О создании информационно-аналитических систем оперативного анализа обстановки на море. // Тр. ДВНИГМИ, темат. вып. «Гидрометеорологические процессы на шельфе: оценка воздействия на морскую среду», Владивосток: Дальнаука, 1998. – С. 159–170.
10. Храмушин В.Н. Гидродинамическая модель источника штормовых нагонов и экстремальных течений под воздействием подвижного атмосферного тайфуна // Заявка на изобретение № 2016150042 от 2016-12-19.
11. Храмушин В.Н. Гидродинамическая модель очага цунами // Заявка на изобретение № 2016150038 от 2016-12-19.
12. Храмушин В. Н. ANI – Прямые вычислительные эксперименты для моделирования цунами, штормовых нагонов, экстремальных течений и приливного режима в открытом океане и вблизи побережья // СахГУ, Роспатент № 2010615848 от 8 сентября 2010 г.
13. Храмушин В.Н. Magio – Интерактивный океанографический программный комплекс для ведения и анализа цифровых приливных архивов и мареографных записей колебаний уровня моря // СахГУ, Роспатент № 2010615847 от 8 сентября 2010 г.
14. Храмушин В.Н. Sakhalin – Информационно-картографическая система // СахГУ, Роспатент № 2010615845 от 8 сентября 2010 г.
15. Храмушин В. Н., Шевченко Г.В., Симаков Е.Е. «Сахалин-море» – Расчетные и регистрируемые колебания уровня моря на Дальнем Востоке России // СахГУ, Роспатент № 2012620509 от 5 июня 2012 г.
16. Шевченко Г.В., Храмушин В.Н. Метод детального цунамирайонирования на примере побережья Анивского залива // Океанология. – 1994. – Т. 34, № 2. – С. 218–233.

РЕЛЬЕФ ДНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКЕАНОГРАФИИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Введение

Пространственное распределение течений и параметров морской воды связано с особенностями подводного рельефа. Над подводными горами, на границе шельфа, в узкостях характер течений, полей температуры и солености меняется. По границам возвышенностей и впадин можно составить предварительное представление о возможных меандрах течений и расположения вихрей. Поэтому при океанографических исследованиях нужно знать размеры котловин и возвышенностей, их граничные изобаты и предельные глубины.

Сайты региональных институтов, атлас Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН [9] и специальная энциклопедия [4] о рельефе дна Японского моря сообщают немного. Так, из монографии [11] читатель узнает про рельеф дна моря следующее. «По характеру рельефа дна море делится на 3 части: северную ($> 44^\circ$ с. ш.), центральную – между 40° с. ш. и 44° с. ш., и южную ($< 40^\circ$ с. ш.)».

Такая информация о подводном рельефе недостаточно информативна для использования в исследовании океанографии моря. Границы котловины заданы широтой без долготы. Цифровые сведения (о порогах, характерных изобатах, высотах возвышенностей, глубинах желобов, координатах подводных вершин и хребтов) отсутствуют. Поиск отсутствующих сведений и составляет цель настоящей работы.

Данные

Для построения горизонтальных и вертикальных схем рельефа дна моря нами использованы сеточные значения глубин GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) [14]), восстановленные в британском центре океанографических данных (Ливерпуль). Эти же данные использованы нами при расчетах течений.

Аналогичная продукция отечественных ЦОД (Центров океанографических данных) или институтов нам неизвестна. Конечно, многолетняя работа судов Дальгеологии, Гидрографической службы Тихоокеанского флота РФ, Дальневосточного отделения РАН создали тысячи промерных станций. Но эти данные нам (и большинству пользователей) недоступны.

По 1- и 5-минутным сеточным данным GEBCO мы определили характеристики основных элементов рельефа. Они представлены ниже в нескольких таблицах.

По сеточным данным были построены поля рельефа дна Японского моря, его частей, а также профили глубин на 16 меридиональных и зональных разрезах, пересекающих море. Их анализ позволил определить основные характеристики элементов рельефа дна: географические границы (координаты), размеры (длину и ширину), экстремальные значения глубин и высот, а также характерные изобаты.

Анализ рельефа дна Японского моря

Общая схема рельефа дна моря, построенная по сеточным данным, представлена на рис. 1. Обычно [4, 9, 11] схема рельефа дна отображается при использовании изобат, кратных 1000 м. Мы же построили схемы котловин и желобов при использовании изобат с разным шагом и выделили характерные. Они – разные для разных котловин. На рис. 1 рельеф отображен изобатами 1000, 2000, 2600, 3000, 3200, 3600 м. Пунктиром показаны широтные границы Центральной (Японской) котловины, указанные Л.А. Зенкевичем [3].

Пунктирными прямоугольниками выделены границы котловин из американского указателя элементов подводного рельефа (<https://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer>) – газеттира [2]. Они повторены в отечественном словаре [1]. Как видно, пунктирные прямоугольники (т. е. назначенные границы котловин) не согласуются с изобатами. Границы Цусимской (Уллындо) котловины в газеттире не даны – там приведены только координаты её центра. На рис. 1 этот центр мы обозначили крестиком. Как видно, и назначенный в [1] центр котловины не согласуется с изобатами.

Японское море по особенностям рельефа дна логично разделить не на три части (по 40° с. ш. и 44° с. ш. [3]), а по основным элементам рельефа. Ниже мы определим характеристики основных элементов подводного рельефа – поднятий, понижений и шельфа, которые важны при исследовании океанографических полей.

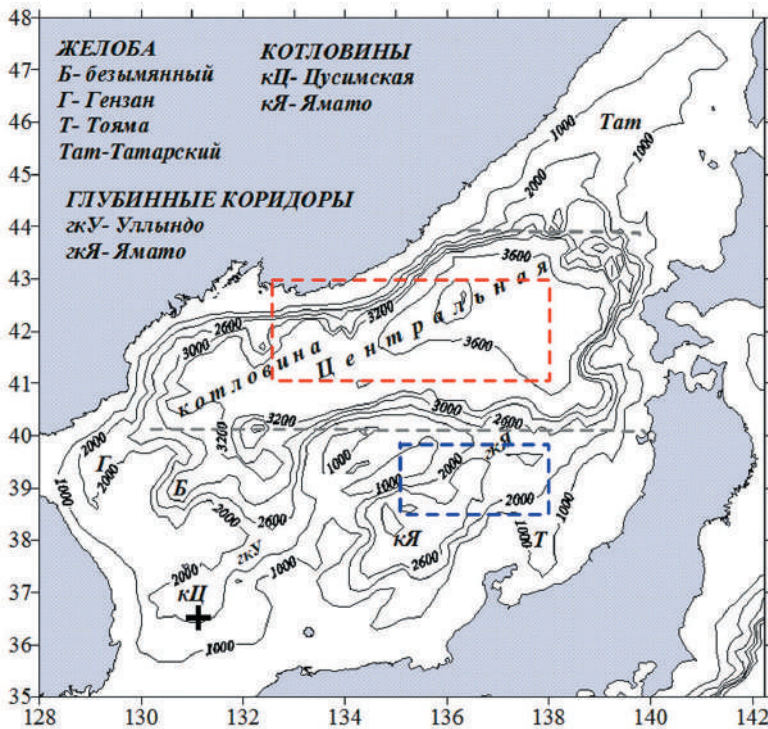


Рис. 1. Котловины и основные желоба Японского моря

Основные понижения дна моря – котловины и желоба. Русский термин «желоб» в отечественных публикациях с 1993 года агрессивно заменяется иностранным термином «трог» (в переводе с немецкого – корыто).

В американском указателе названий элементов подводного рельефа [2] и в отечественном справочнике названий [1] границы Центральной котловины обозначены только координатами без привязки к изобатам. На рис. 1 эти границы представлены пунктирным прямоугольником. Видно, что они не соответствуют какой-либо замкнутой изобате.

Таким образом, координаты границ котловины в этих [1, 2] справочниках неверны. И вообще, границы котловин лучше описывать изобатами, а не координатами.

В табл. 1 представлены определенные нами характеристики котловины и желобов. Значения максимальной глубины (H_{\max}) подробно рассмотрены нами ранее [13]. Табличные характеристики котловин и желобов нуждаются в пояснении, которое приведено далее.

Таблица 1. Характеристики котловин и желобов Японского моря

Котловина (к) или желоб (ж)	Границы (с. ш. и в. д.)	ДШ, км	ИзК, м	H_{\max} , м	Примечание
к. Центральная (Японская)	130.5° – 139.2° 40.5° – 43.8°	800 × 550	3200	3753	
к. Цусимская (Уллындо)	130.4° – 131.5° 36.3° – 37.6°	220 × 60	2200	2282	
к. Ямато (Хонсю)	134.3° – 136.8° 37.3° – 39.5°	450 × 100	2600	3063	
ж. Гензан	128.3° – 130.5°	280	1800	2900	3000 м – на входе
ж. без имени (Криштофовича)	130.0° – 131.2° 38.0° – 39.5°	220	1900	3100	3100 м – на входе
ж. Татарский	138.0° – 141.5° 44.5° – 51.5°	780	1000	2400	На 46° с. ш. – 120 км × 1600 м На 47° с. ш. – 110 км × 1200 м На 48° с. ш. – 75 км × 800 м На 49° с. ш. – 55 км × 220 м На 50° с. ш. – 50 км × 160 м
ж. Тояма	137.8°, 37.3° – 38.8°	160	1000	2000	2000 м на входе

Примечание: К – котловина. ДШ – длина и ширина (км). ИзК – изобата, описывающая контур котловины/желоба.

Котловины

Под котловиной понимают обширное замкнутое понижение дна. Японское море полностью изолировано от соседних морей уже на горизонте 150 м. На горизонте 2200 м изолируется *Цусимская (Уллындо) котловина*. *Котловина Ямато (Хонсю)* становится замкнутой на глубине 2600 м. Ниже горизонта 3200 м остается только *Центральная (Японская) котловина*.

Обычно [3, 4, 9] рельеф дна моря (и, соответственно, котловины) описывались изобатами, кратными 1000 м. Но он изменится, если использовать другие изобаты.

Центральная котловина. Границы (предельные широты и долготы) Центральной котловины при других изобатах представлены в табл. 2.

Таблица 2. Границы Японской котловины при использовании разных граничных изобат

Граничная изобата	Граничные широты (с. ш.)	Граничные долготы (в. д.)
1900 м	36.3° – 45.5°	128.5° – 139.5°
2800 м	37.5° – 44.0°	130.0° – 139.5°
3000 м	38.7° – 44.0°	130.5° – 139.0°
3200 м	40.5° – 44.0°	130.5° – 139.0°
3300 м	40.5° – 44.0°	131.5° – 139.0°

Чтобы соответствовать указанной на сайтах и в энциклопедиях южной границе Центральной котловины (40° с. ш.) или определенной нами (40.5° с. ш.), граничной должна быть изобата не 3000 м, а 3200 м.

Цусимская котловина. В корейских публикациях (например, в [12]) границы этой котловины не определены (рис. 2). Котловина – это замкнутая (изобатой) часть моря. Ее нет на левом (из [12]) рисунке. UIG – это коридор от Центральной котловины к Цусимской. На построенном нами (правом) рисунке Цусимская котловина ограничена изобатой 2200 м, а широтные её границы – 36.5° с. ш. и 37.5° с. ш.

В справочниках [1] и [2] центр Цусимской (Уллындо) котловины расположен в точке с координатами 36.5° с. ш., 131° в. д. Он обозначен крестами на рис. 1 и рис. 2. Как видно, его положение – неверно: оно не соответствует изобатам. Верные координаты центра Цусимской котловины – 37° с. ш., 131° в. д.

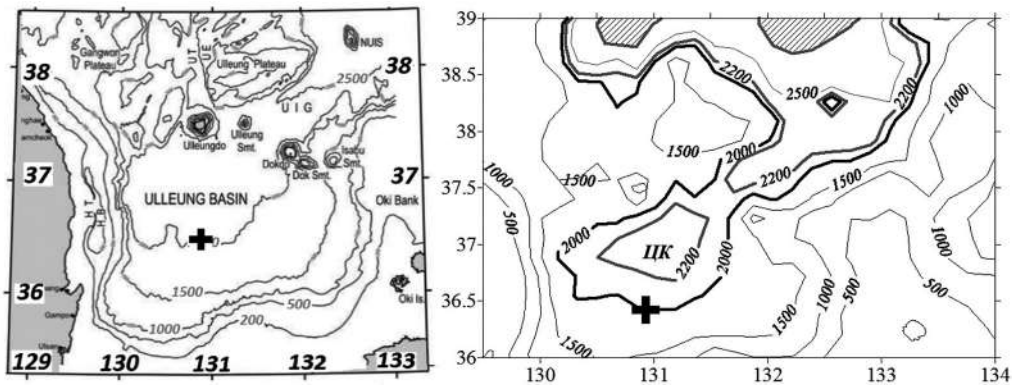


Рис. 2. Котловина Цусимская (Уллындо). Слева – из корейской монографии [12]. Справа – рисунок, построенный нами по данным GEBCO. Крестами обозначен центр Цусимской котловины по координатам, указанным в [2]. Ulleungdo (кор.) / Мацусима (яп.) – о-в Дажелет.

Ulleung smt – г. Уллу. Dokdo (кор.) / Takesima (яп.) – острова Лианкур

Коридор (UIG) Уллындо, соединяющий Центральную котловину с Цусимской, описывается той же изобатой, что ограничивает котловину – 2200 м. Он заканчивается перед порогом между подводной горой Уллын и островами Лианкур.

Котловина Ямато. Между возвышенностью Ямато и островом Хонсю расположена вторая минорная котловина моря – Ямато. Её широтные границы – 37.3° с. ш. и 39.5° с. ш. Граница между ней и Центральной котловиной – сгущение изобат от 2600 м до 3200 м, а её замкнутая область определяется изобатой 2600 м (рис. 3). С запада котловина ограничена стеной (1200 м – 2400 м) южной банки Ямато. На востоке котловина ограничена крутым островным склоном (1000 м – 2200 м).

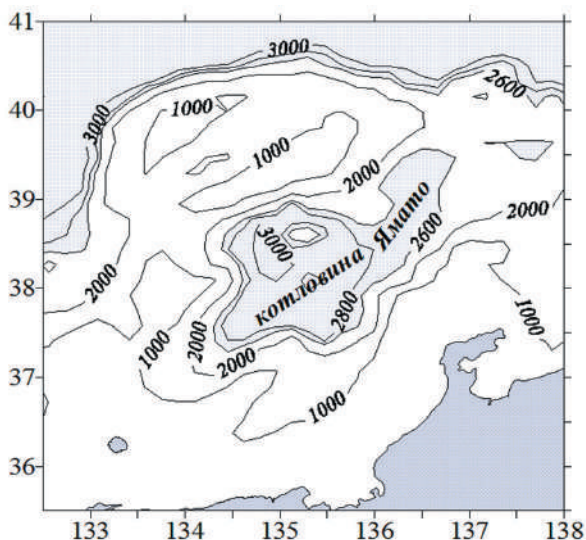


Рис. 3. Котловина Ямато

Вертикальная граница между котловинами Ямато и Цусимской (Уллындо) начинается на горизонте 1100 м. То есть циркуляция вод в этой части моря выше горизонта 1000 метров и ниже него должны сильно отличаться.

Профиль дна на разрезе по 38.5° с. ш.

На разрезе по 38.5° с. ш. (рис. 4) последовательно расположены пять глубоких понижений дна. Такое расположение впадин говорит о том, что движение глубинных вод моря проходит преимущественно вдоль меридианов, чем вдоль параллелей.

Кроме котловин важными понижениями подводного рельефа являются желоба: Татарский, Гензан, безымянный и Тояма. После глобализации (приведения русских традиционных терминов в соответствие с американскими) желоба стали называть в отечественных публикациях только трогами.

Желоб Гензан проходит от Центральной котловины вдоль континентального берега довольно далеко на запад и на юг. В его конце – обширное плато с глубинами более 2000 м (рис. 5).

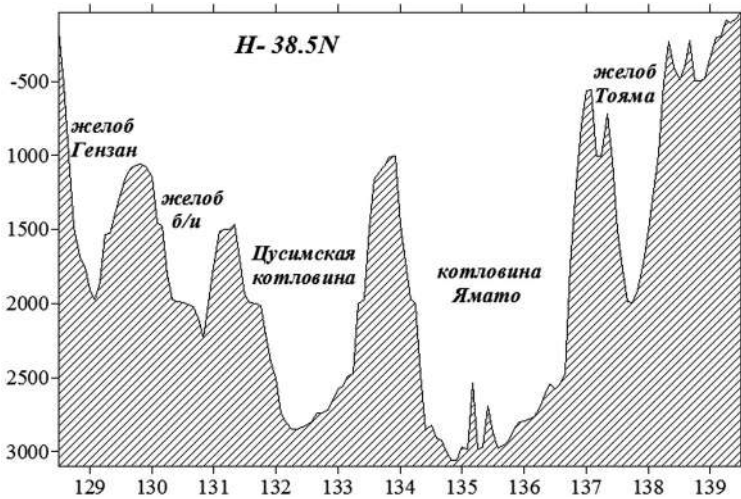


Рис. 4. Разрез через котловины и желоба по 38.5° с. ш.

Океанография района не изучена. Можно только предполагать, что, кроме известного переноса холодных вод на юг вдоль берега, должен быть и перенос теплых вод на север вдоль Восточно-Корейской возвышенности.

Желоб без имени. В нескольких отечественных публикациях (например, в [10]) он назван трогом Криштофовича. Но в большинстве отечественных публикаций и во всех иностранных этот желоб – безымянный. Он расположен в экономической зоне КНДР, а А.Н. Криштофович – русский геолог. Принимая во внимание исчезновение всех русских географических имен в экономической зоне КНДР, ожидать,

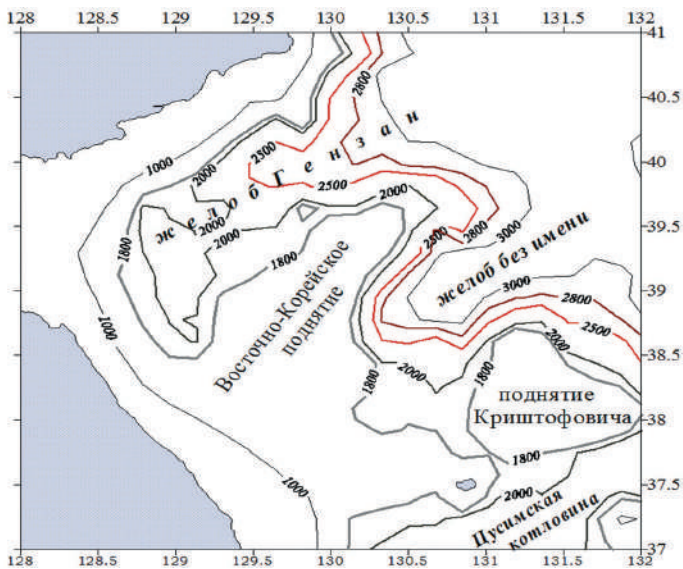


Рис. 5. Желоба Гензан и безымянный

что такое имя когда-нибудь будет принято иностранным сообществом, не придется. Поэтому логично оставить этот желоб безымянным.

Желоб Татарский. Татарский желоб имеет ясно различимую границу с Центральной котловиной между изобатами 2500 м и 3000 м, рис. 6. На широте 44° с. ш. Центральная котловина резко сужается и переходит в этот глубоководный желоб. Глубина желоба уменьшается по мере продвижения с юга на север: с 2500 м на южной границе желоба до 200 м на 49.5° с. ш. и до 160 метров на 50° с. ш.

Значения ширины Татарского желоба и его глубины в разных местах приведены в табл. 1 и на рис. 7.

На 44° с. ш. посредине Татарского желоба расположен подводный хребет. Глубины в Татарском желобе по мере движения с юга на север уменьшаются ступенями (на 46.5° с. ш. и на 49° с. ш.), рис. 8. В его восточной части есть место (в районе Холмска – на 47° с. ш.), где желоб очень близко подходит к берегу Сахалина. Однако простота рельефа Татарского пролива – кажущаяся: 5-минутные сеточные данные не отображают все его особенности. При использовании разных наборов глубин возможны открытия. Интересно, что некоторые авторы свои открытия оставили без комментариев. Так, А. Моги [16] не прокомментировал показанные в его атласе необычный отрог склона и отдельное от Татарского желоба замкнутое понижение дна с центром на 47.5° с. ш. С. Пранц [8] не объяснил появление на его рисунке неизвестной ранее котловины с центром на 50° с. ш., рис. 9.

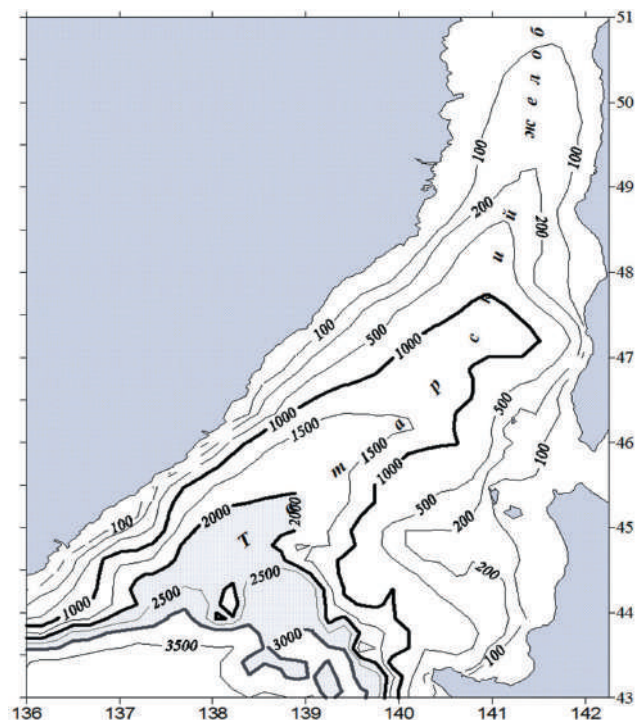


Рис. 6. Татарский желоб

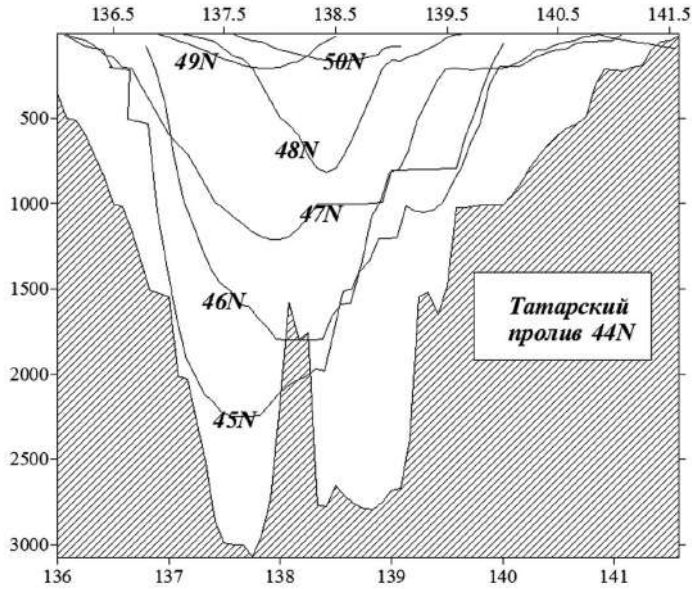


Рис. 7. Профили дна на разных широтных разрезах через Татарский желоб

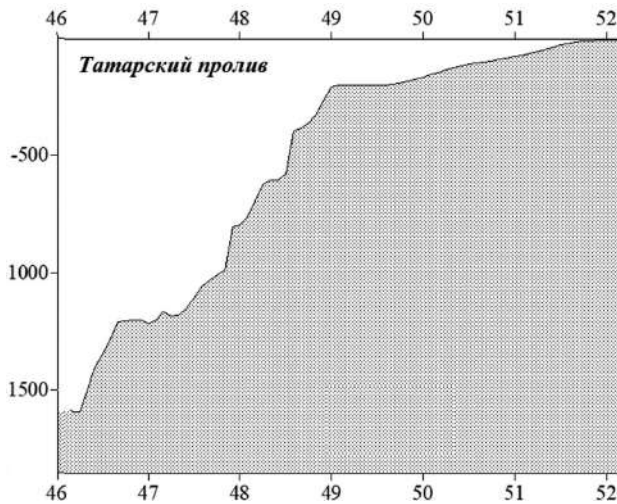


Рис. 8. Профиль дна на разрезе вдоль Татарского желоба (46° с. ш. – 52° с. ш.)

Хребты и горы Японского моря

Нужно помнить, что по мере исследования происходят изменения и понятий, и цифровых характеристик элементов рельефа дна. Вместо гор появляются хребты или возвышенности. Изменяются их координаты, размеры и высоты.

Наиболее важными характеристиками гор, хребтов и поднятий для океанографии являются их координаты и минимальные высоты. Они приведены в таблице 3.

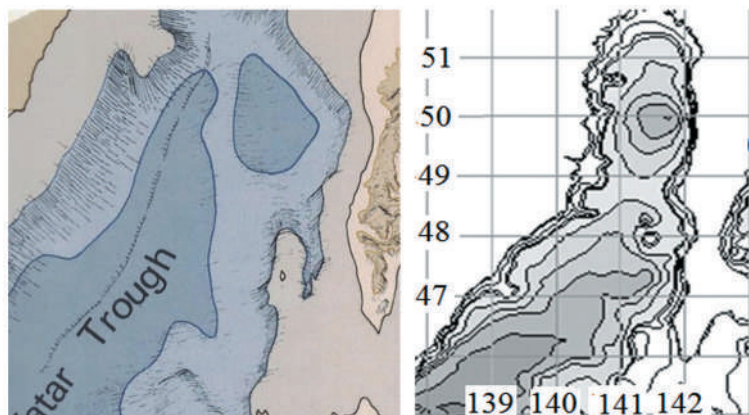


Рис. 9. Необычные элементы рельефа дна Татарского пролива [15] – слева, [16] – справа

Подводная гора Сибирь (1600 м) – мелковата для такого имени. Естественно, что русские так бы эту подводную гору не назвали. Значит, так ее назвали японцы. Они часто на месте Приморского края или горной системы Сихотэ-Алинь пишут «Сибирь». Для них это – что-то одинаково далекое и холодное. Неясно, когда они эту возвышенность исследовали, чтобы так назвать: на карте М. Уда [5] этой

Таблица 3. Характеристики глубоководных возвышенностей (вв), хребтов (хр) и гор (г) Японского моря

Объект	Примерные координаты ° в.д. и ° с.ш.	Изо, м	Нмин, м	Примечание
Алпатова, вв	137.5–137.5, 44.2	1500		отрог склона
Богорова, вв	136.3–136.5, 42.3–43	3300	1300, 2070	20 x 80км [13]
Витязя, вв	138.2, 44.0	2200	1086	[5]
В.-Корейская, вв	139.0, 38.5–39.5	2500	672	
Криштофовича, вв	131.0, 38.0	1900		
Оки, вв	133.5, 37.0–38.0	500	330	Длина 275 км
Окусири, хр	139.5, 43.0–44.0	1000		Длина 110км
«Первенца», вв	132.2, 40.0	2500	1064	Безымянная в [5]
Садо, хр	139.0, 38.3–40.0	500		Длина 140 км
Ямато сев., хр	134.0, 40.0	1000	383	
Ямато юж., хр	135.0, 39.5	1000	236	
Берсенева, г.	133.95, 42.0	3000	1760	Вместе они – вв Тарасова [14]
Васильковского, г.	134.05, 42.0	3000	2550	
Кольцо, г	132.4, 39.5	2500		132.3, 40.5 [7]
Петра Великого, г	132.23, 42.0	2600	1620	[15]
Сибирь, г	132.34, 41.75	2000	1600	[15]
	132.25, 41.45			[7]

Примечание: Изо – изобата, ограничивающая возвышенность. Нмин – минимальная глубина моря над поднятием.

горы нет, а после съёмок 30-х годов японские исследователи к Владивостоку уже не приближались. Возвышенности Богорова (рис. 10), Берсенева и Васильковского [17] представляют собой парные горы.

Изменение представлений о месте и высоте подводных гор под Владивостоком по мере исследований можно оценить сравнением публикаций разных лет ([17] и [6], рис. 11).

Гора Петра Великого [2] в последней публикации вошла в пределы возвышенности Первенца и понизилась на 500 м. Зато гора Сибирь подросла на 200 м. Самая высокая гора возвышенности также стала выше, но осталась безымянной.

Среди нескольких опубликованных именовании возвышенности (Первенец, «Первенец», «Первенца») «возвышенность Первенца» представляется наиболее приемлемой (по подобию «возвышенности Витязя»).

Шельф Японского моря

По сравнению с Беринговым (45 % площади с глубиной менее 200 м) и Охотским (40 %) шельф Японского моря невелик (только 24 % площади с глубиной менее 200 м). В отличие от других морей, его шельф не представляет собой одного целого.

В Беринговом море шельф занимает северо-восточную половину моря, в Охотском море – северо-западную. А в Японском море обширные участки шельфа находятся и в Татарском проливе, и в районе, примыкающем к проливу Лаперуза, и в Цусимском проливе (рис. 12), и в заливе Петра Великого.

Самые узкие участки с глубинами менее 200 м расположены вдоль Приморья и Корейского полуострова (табл. 4).

Автор благодарен В.Б. Лобанову за замечания и конструктивные предложения, существенно улучшившие статью.

Автор признателен британскому Центру океанографических данных за предоставленные данные о глубинах моря.

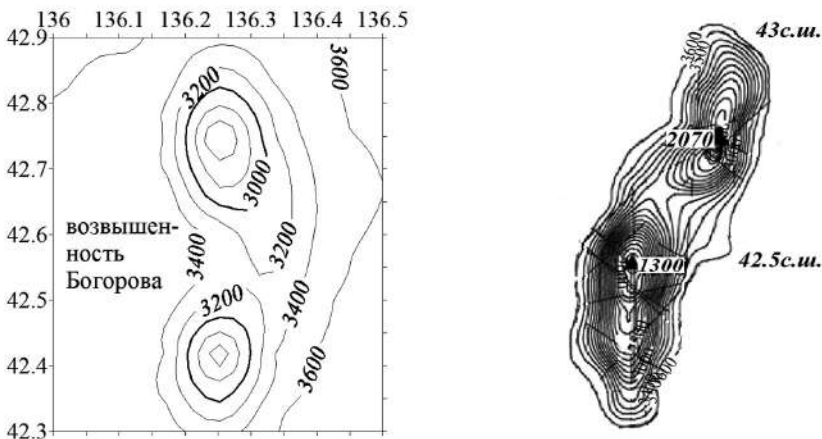


Рис. 10. Возвышенность Богорова. Слева – построенные нами по сеточным данным. Справа – из [7]

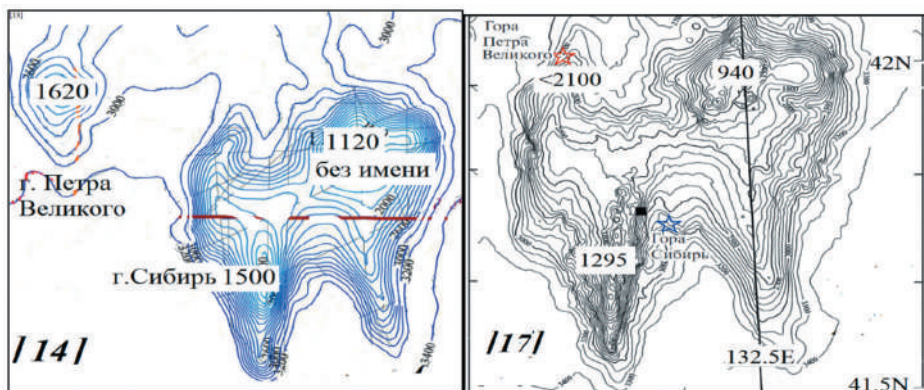


Рис. 11. Изменение представлений о месте и высоте гор возвышенности Первенца. Положение гор по [2] обозначено звездочками

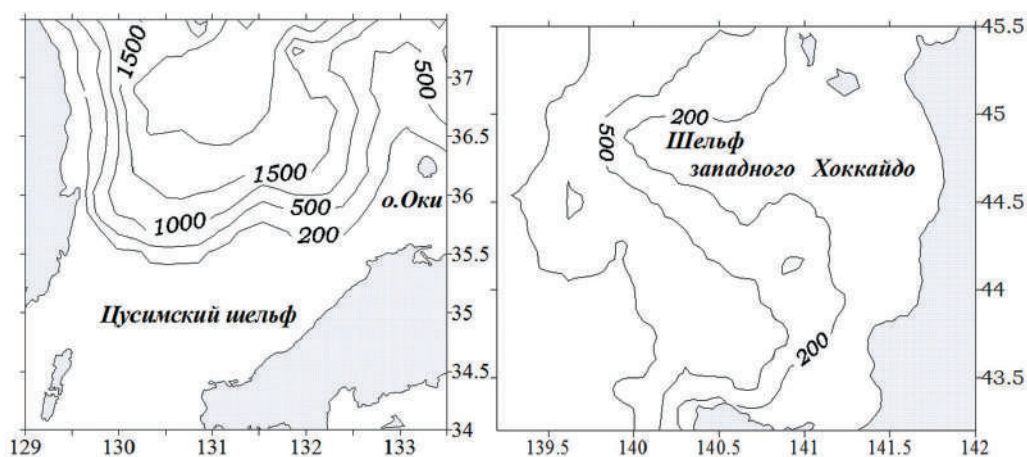


Рис. 12. Шельф у проливов Цусимского и Лаперуза

Таблица 4. Характеристики шельфа в разных местах Японского моря

Место	Ширина	Контурная изобата
Татарский пролив	2х30 км (45° – 49° с. ш.), 100–150 км (49° – 51.5° с. ш.)	200м (до 49.2° с.ш.), 100м (до 50.8° с. ш.), 50м (до 51.3° с. ш.)
Вв Алпатова	80 км	500 м
Западнее Хоккайдо	200 км	500 м
ЗПВ	80 км	100 м
Оки – вв Ямато	100 км	200 м
Цусимский пролив	400 км	200 м

Примечание: Вв – возвышенность.

Литература

1. Агапова Г.В., Виноградова Н.В., Кашникова И.П. /Словарь географических названий форм подводного рельефа – М.: ГИН РАН. – 1993. – 311 с.
2. Газеттир. Американский (NOAA) справочник имен элементов рельефа дна Мирового океана. <https://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer>
3. Зенкевич Н.Л. Рельеф дна / Основные черты геологии и гидрологии Японского моря. – М.: Изд – во АН СССР. – 1961. – С. 5–22.
4. Зонн И. С., Костяной А.Г. Японское море /Энциклопедия. – М.: Международные отношения. – 2009. – 421 с.
5. Карнаух В.Н., Карп Б.Я., Цой И.Б. Сейсмостратиграфия осадочного чехла и процессы осадконакопления на возвышенности Первенца и в её окрестностях (Японское море) // Морская геология. – 2004. – Т. 44, № 6. – с. 1–14.
6. Карнаух В.Н., Коптев А.А., Суховеев Е.Н., В.П. Матюхов В.П., Апарина К.А. Рельеф подводной возвышенности Первенец (Японское море) // Геоморфология. – 2020. – № 2. – С. 50–59.
7. Карнаух В.Н., Цой И.Б. Сейсмическая стратиграфия и условия формирования осадочного чехла Японского моря в районе возвышенности Богорова // Морская геология. – 2010. – N. 50, № 4. – С. 590–607.
8. Пранц С.В., Пономарев В.И., Будянский М.В., Улейский М.Ю., Файман П.А. Лагранжев анализ перемешивания и переноса вод в морских заливах // Известия РАН, сер.ФАО. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 91–106.
9. Ростов И. Д., Юрасов Г.И., Рудых Н.И., Мороз В.В., Дмитриева Е.В., Ростов В.И., Набиуллин А.А., Храпченков Ф.Ф., Бунин В.М. Атлас по океанографии Берингова, Охотского и Японского морей // ТОИ ДВО РАН, Владивосток. – 2005 (компакт-диск).
10. Цой И.Б., В.Н. Карнаух В.Н., Леликов Е.П. Наименования подводных морфоструктур Японского моря – история и современные проблемы // Океанология. – 2013. № 6. – С. 800–812.
11. Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря / Владивосток: ДВО АН СССР. – 1991. – 176 с.
12. Chang K.-I., Zhang C.I., Park C., Kang D.J., Ju S.J., Lee S.H. Oceanography of the East Sea (Japan Sea) / eds.// Springer. – 2016. – 460 pp.
13. Danchenkov M.A. Maximum depth of the Sea of Japan // Asia – Pacific J. Marine science and education. – 2019. – V. 9. – № 2. – P. 18–27.
14. GEBCO, British Oceanographic Data Center <https://gebcocenter.org>
15. Int. Conference on the Sea of Japan./Ed. Valencia M.J. Honolulu: East – West Center Press. – 1989. 239 pp.
16. Mogi A. An Atlas of the Sea floor around Japan. Aspects of submarine geomorphology // Tokyo: Tokyo Univ.Press. – 1979. – 96 pp.
17. Tsoy I.B., Karnaukh V.N., Lelikov Ye.P. Undersea features of the NW Japan/East sea floor and an implication of their nomenclature // The 2nd Int. Symp. on application of marine geophysical data and undersea features. October 17–19, 2007, Korea. Incheon, 2007. P. 82–100.
18. Uda M. (1934): The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June 1932 // J. Imp.Fish.Exp.Station, v.5, p.57–190.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ДОПУСТИМЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ УРОВНЯ ВОДЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПРАВДЫВАЕМОСТИ ПРОГНОЗОВ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ ПРИМОРЬЯ

Введение

Развитие методов математического моделирования гидрологических процессов и расширение области их использования в различных отраслях гидрологии активно развивается во всех странах мира, включая Россию, и перспективы дальнейших успехов не вызывают сомнений [1]. Количество математических моделей формирования стока и связанных с ними методов гидрологических прогнозов водного режима постоянно продолжает расти, позволяя получать прогнозы по таким пунктам и рекам, для которых ранее получить методику прогноза не представлялось возможным. Соответственно, при отсутствии методик, до настоящего времени не разрабатывались и критерии оценки оправданности прогнозов для таких пунктов.

В Приморском УГМС для бассейна Верхней Усури допустимые погрешности установлены для шести гидрологических постов, что составляет 35 % от общего количества постов водосбора (рис. 1). Внедрение и использование в оперативной практике современных гидрологических моделей позволяет получать прогнозы уровней по всем гидрологическим постам, входящим в бассейн. В настоящей работе представлен подход к расчету допустимых погрешностей уровней рек



Рис. 1. Бассейн р. Усури до п. Кировский (24 400 км²)

бассейна р. Уссури с замыкающим створом у п. Кировский для определения оправдываемости прогнозов дождевых паводков.

Дождевые паводки в Приморье в условиях муссонного климата вызываются ливневыми осадками во время выхода тайфунов и циклонов. Нередко обильные осадки выпадают и во время активной циклонической деятельности на полярном фронте, который часто стационарирует над Приморским краем. Фронт осадков движется в определённой последовательности во времени и пространстве, в связи с этим паводки на реке приобретают разные размеры и форму. Форма паводка зависит от конфигурации бассейна и времени добегания паводочных волн по длине реки.

Водосбор р. Уссури с замыкающим створом у п. Кировский представляет собой низко- и среднегорный участок Южного Сихотэ-Алиня. Среднегорье распространено в верховьях рек на юге и юго-востоке, низменные участки приурочены к западной и северо-западной частям, в среднем течении основные реки обычно протекают в межгорных котловинах. Абсолютные отметки основных водоразделов находятся в диапазоне 400–600 м, максимальная – 1850 м. В питании рек преобладают дождевые воды, хотя в отдельные годы сток талых вод может достигать до 20 % от годового объема.

Дождевые паводки формируются сложными, часто длительными дождями с 2–3 центрами максимальной интенсивности. Ливневые осадки распределяются по площади водосбора неравномерно, часто паводки следуют непрерывно друг за другом, между ними наблюдается кратковременная межень. В течение теплого периода года по р. Уссури проходит до 3–5 паводков, а в отдельные годы – до 8. Наиболее высокие подъемы уровня воды наблюдаются с июля по сентябрь, в отдельные годы и в октябре [6].

Материалы и методы

В ДВНИГМИ в соответствии с планом НИТР на 2020–24 гг. ведется разработка гидрологической модели, созданной на основе адаптации концептуальной модели формирования стока GR4J (in French, modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) [2, 3, 4]. Получаемый моделью массив прогнозов уровней рек по 16 постам бассейна р. Уссури нуждается в оценке успешности прогнозов по всем постам исследуемого водосбора. В основу принципа оправдываемости отдельных гидрологических прогнозов, согласно Наставлению по службе прогнозов, положено назначение допустимой погрешности прогноза [5]. В Приморском УГМС для данного бассейна допустимые погрешности уровней приняты для 6 постов для заблаговременности 1 сутки и для 3 постов для заблаговременности 2 суток. Таким образом, возникла необходимость расчета допустимых погрешностей для всех гидропостов водосбора Верхней Уссури.

Прогноз считается оправдавшимся, если погрешность прогноза за каждый день (разность между фактическим уровнем и прогностическим) равна или меньше этой допустимой погрешности. При установлении допустимой погрешности используют характеристику природной вариации прогнозируемого элемента –

среднее квадратическое отклонение прогнозируемой величины (в нашем случае уровня реки) за период заблаговременности прогноза от нормы.

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta_i - \Delta_{cp})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где σ_{Δ} – среднеквадратичное отклонение изменения уровня воды от нормы этого изменения, см; Δ_i – изменение фактического уровня за период заблаговременности, см; Δ_{cp} – норма этого изменения (либо среднемноголетнее значение), см; n – число членов ряда.

В качестве допустимой погрешности отдельного прогноза ($\sigma_{доп.}$) принято:

$$\sigma_{доп.} = 0,674\sigma_{\Delta}, \quad (2)$$

Для того, чтобы рассчитать σ_{Δ} , необходимо определить многолетний период, по которому будут выполнены расчеты, периоды в году, когда наблюдаются дождевые паводки, а также выбрать параметры, по которым можно определить начало и окончание дождевого паводка.

Многолетний период был выбран за 30 лет: с 1990 по 2019 г. За календарный период в году принят период с июня по октябрь, когда выпадает наибольшее количество осадков (>80 % от среднегодового количества). Для определения периодов дождевых паводков был установлен условный уровень:

$$H_{усл.} = H_{ср.много.} + \sigma, \quad (3)$$

где $H_{усл.}$ – условный уровень при достижении которого начинается паводок, см; $H_{ср.много.}$ – среднемноголетний уровень воды за 30 лет (в периодах с июня по октябрь), см; σ – среднеквадратическое отклонение уровня воды (за 30 лет с июня по октябрь), см.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (H_i - H_{ср.много.})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

где H_i – фактический уровень, см; $H_{ср.много.}$ – среднемноголетний уровень за 30 лет (в периодах с июня по октябрь), см; n – число членов ряда.

При повышении уровня воды в реке выше условного уровня $H_{усл.} > H_{ср.много.} + \sigma$ паводок начинается, при снижении ниже условного уровня $H_{усл.} < H_{ср.много.} + \sigma$ – прекращается.

Результаты и обсуждения

Расчеты допустимых погрешностей были выполнены для 17 гидрологических постов, находящихся в пределах водосбора р. Усури – п. Кировский.

По средним суточным значениям уровней воды с июня по октябрь 1990–2019 гг. на каждом гидропосту были рассчитаны среднемноголетний уровень $H_{ср.много.}$, среднеквадратическое отклонение уровня σ и условный уровень $H_{усл.}$. Для постов Ясное и Чернышевка, в связи с недостаточностью ряда наблюдений, расчет

производился по средним суточным значениям уровней за период июнь-октябрь с 2000 по 2019 г. Для поста Яковлевка расчет не производился в связи с коротким рядом наблюдений (с 2014 г.) В табл. 1 представлены результаты расчета рассматриваемых характеристик для рек бассейна Усури (до п. Кировский).

Далее из общего ряда наблюдений были выбраны периоды дождевых паводков, когда уровень воды в реках на гидропостах был выше условного уровня $H_{\text{усл.}}$, и рассчитаны изменения уровня за период заблаговременности t . Расчеты были выполнены для трех периодов заблаговременности: 1, 2, и 3 суток. По полученным рядам периодов паводков ($>H_{\text{усл.}}$) для каждой заблаговременности был произведен расчет допустимых погрешностей $\sigma_{\text{доп}}$. В таблице 2 приводятся полученные допустимые погрешности для трех заблаговременностей.

Полученные допустимые погрешности отличаются от погрешностей, действующих в ФГБУ «Приморское УМС». Сравнение возможно провести для пяти постов для заблаговременности 1 сутки и для двух постов для заблаговременности 2 суток. Для заблаговременности 1 сутки для гидропостов Верхняя Бреевка и Новомихайловка рассчитанные значения допустимых погрешностей ниже действующих в Приморском УГМС на 2 и 10 см соответственно, для постов

Таблица 1. Средние многолетние уровни, среднеквадратические отклонения и условные уровни для рек бассейна Усури (до п. Кировский)

№ п/п	Река – Гидропост	Средний многолетний уровень $H_{\text{ср.многол.}}$, см	Среднеквадратическое отклонение уровня σ , см	Условный уровень $H_{\text{усл.}}$, см
1	р. Усури – с. Ясное	183,4	28,0	211
2	р. Усури – с. Верхняя Бреевка	188,7	32,4	221
3	р. Усури – с. Новомихайловка	172,2	35,8	208
4	р. Усури – с. Кокшаровка	110,9	58,0	169
5	р. Усури – р. п. Кировский	208,7	90,3	299
6	р. Извилинка – пос. Извилинка	145,2	26,6	172
7	р. Каменка – с. Каменка	103,5	18,0	122
8	р. Павловка – с. Антоновка	207,5	30,7	238
9	р. Павловка – с. Уборка	162,4	44,4	207
10	р. Откосная – с. Самарка	374,2	41,6	416
11	р. Арсеньевка – пос. Виноградовка	225,5	36,4	262
12	р. Арсеньевка – с. Анучино	258,9	36,6	296
13	р. Арсеньевка – с. Яковлевка	-	-	-
14	р. Муравейка – пос. Гродеково	135,3	29,2	165
15	р. Тихая – с. Чернышевка	181,6	70,8	252
16	р. Варфоломеевка – с. Варфоломеевка	151,9	33,3	185
17	р. Крыловка – с. Крыловка	69,7	74,8	145

Таблица 2. Допустимые погрешности для прогнозов уровней воды с заблаговременностью 1, 2 и 3 суток для рек бассейна Усури (до п. Кировский)

№ п/п	Река – Гидропост	Допустимая погрешность ($0,674 \cdot \sigma \Delta$), см		
		Заблаговременность 1 сутки	Заблаговременность 2 суток	Заблаговременность 3 суток
1	р. Усури – с. Ясное	14	24	31
2	р. Усури – с. Верхняя Бреевка	18	29	36
3	р. Усури – с. Новомихайловка	14	25	32
4	р. Усури – с. Кокшаровка	20	36	48
5	р. Усури – р. п. Кировский	19	37	52
6	р. Извилинка – пос. Извилинка	13	23	28
7	р. Каменка – с. Каменка	6	9	12
8	р. Павловка – с. Антоновка	16	27	33
9	р. Павловка – с. Уборка	18	32	41
10	р. Откосная – с. Самарка	20	32	39
11	р. Арсеньевка – пос. Виноградовка	29	44	49
12	р. Арсеньевка – с. Анучино	28	45	53
13	р. Арсеньевка – с. Яковлевка	-	-	-
14	р. Муравейка – пос. Гродеково	18	30	36
15	р. Тихая – с. Чернышевка	25	42	53
16	р. Варфоломеевка – с. Варфоломеевка	30	48	55
17	р. Крыловка – с. Крыловка	27	49	63

Кокшаровка, Кировский и Анучино – выше на 1, 2 и 7 см соответственно. Шестым постом, для которого в УГМС установлена допустимая погрешность, является пост Яковлевка, но, в связи с ограниченным количеством данных по уровням, рассчитать допустимые погрешности для этого поста не представилось возможным. Для заблаговременности 2 суток рассчитанные значения допустимых погрешностей для постов Кокшаровка и Кировский выше принятых в УГМС на 7 и 6 см соответственно.

Оценка оправдываемости прогнозов уровней рек бассейна Верхней Усури, полученных моделью GR4J с использованием рассчитанных допустимых погрешностей, была произведена для периода июнь-октябрь 2023 г. (табл. 3).

В связи с отсутствием достаточного ряда наблюдений для поста Яковлевка расчет оправдываемости производился по допустимым погрешностям, ранее принятым в ПУГМС для 1- и 2-суточной заблаговременности. Для поста р. Усури – с. Ясное расчет прогноза моделью не производился в связи с отсутствием данных о расходах воды.

Наилучшую оправдываемость показывают гидропосты Верхняя Бреевка, Кокшаровка, Антоновка, Уборка, Гродеково, Варфоломеевка. Эти шесть постов имеют оправдываемость в среднем выше 70 %. Наихудшая оправдываемость

Таблица 3. Оправдываемость прогноза уровня воды по модели GR4J за период июнь-октябрь 2023 г. для рек бассейна Уссури (до п. Кировский)

№ п/п	Река – гидропост	Оправдываемость, %		
		1 сутки	2 суток	3 суток
1	р. Уссури – с. Ясное	-	-	-
2	р. Уссури – с. Верхняя Бреевка	78	86	89
3	р. Уссури – с. Новомихайловка	48	74	79
4	р. Уссури – с. Кокшаровка	71	85	88
5	р. Уссури – р. п. Кировский	52	75	85
6	р. Извилинка – пос. Извилинка	45	63	77
7	р. Каменка – с. Каменка	21	30	55
8	р. Павловка – с. Антоновка	74	82	81
9	р. Павловка – с. Уборка	75	79	80
10	р. Откосная – с. Самарка	50	65	79
11	р. Арсеньевка – пос. Виноградовка	51	82	84
12	р. Арсеньевка – с. Анучино	63	82	83
13	р. Арсеньевка – с. Яковлевка	50	71	-
14	р. Муравейка – пос. Гродеково	75	80	86
15	р. Тихая – с. Чернышевка	50	73	83
16	р. Варфоломеевка – с. Варфоломеевка	81	87	87
17	р. Крыловка – с. Крыловка	43	74	85

за исследуемый период у р. Каменка – п. Каменка – 21 % для заблаговременности 1 сутки, 30 % для 2-суточной и 55 % для 3-суточной заблаговременности.

С увеличением периода заблаговременности прогноза растет оправдываемость прогнозов, что связано с увеличением значений допустимых погрешностей на каждые последующие сутки заблаговременности. Это объясняется более высокими значениями в формуле (1) изменения фактического уровня Δ_i за двое или трое суток, чем за одни.

Оправдавшиеся прогнозы в зависимости от величины погрешности подразделяются на:

- 1) отличные, при погрешности прогноза менее $0,3 \sigma_{\text{доп}}$;
- 2) хорошие, при погрешности прогноза от $0,3 \sigma_{\text{доп}}$ до $0,6 \sigma_{\text{доп}}$;
- 3) удовлетворительные, при погрешности прогноза от $0,6 \sigma_{\text{доп}}$ до $1 \sigma_{\text{доп}}$.

Прогнозы уровня с погрешностью 5 см и менее считаются отличными независимо от $\sigma_{\text{доп}}$ [5].

На рис. 2, 3 и 4 представлены распределения количества оправдавшихся прогнозов по грациям для заблаговременностей 1, 2 и 3 суток.

Наибольшее количество отлично оправдавшихся прогнозов с заблаговременностью 1 сутки отмечается на постах Верхняя Бреевка и Варфоломеевка. В целом по бассейну на оценку «удовлетворительно» оправдалось 29 % прогнозов, на «хорошо» – 26 %, на «отлично» – 45 % прогнозов.

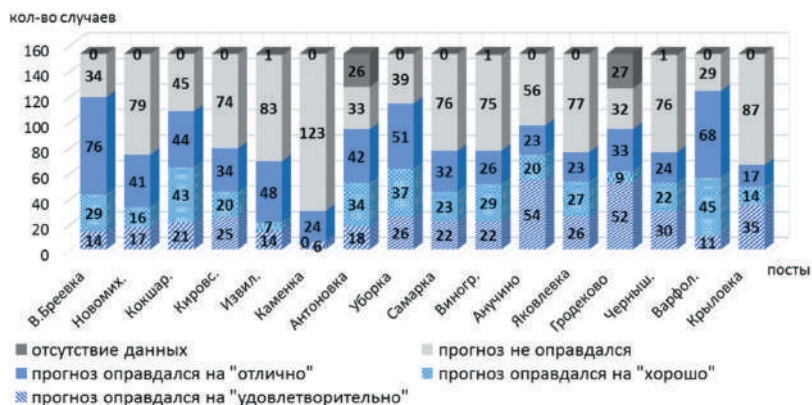


Рис. 2. Распределение количества случаев оправдавшихся и неоправдавшихся прогнозов с заблаговременностью 1 сутки за период июнь-октябрь 2023 г.



Рис. 3. Распределение количества случаев оправдавшихся и неоправдавшихся прогнозов с заблаговременностью 2 суток за период июнь-октябрь 2023 г.



Рис. 4. Распределение количества случаев оправдавшихся и неоправдавшихся прогнозов с заблаговременностью 3 суток за период июнь-октябрь 2023 г.

С заблаговременностью 2 суток в целом по бассейну на оценку «удовлетворительно» оправдалось 26 % прогнозов, на «хорошо» – 35 %, на «отлично» – 40 % прогнозов.

С заблаговременностью 3 суток в целом по бассейну на оценку «удовлетворительно» оправдалось 25 % прогнозов, «хорошо» – 35 %, «отлично» – 40 % прогнозов.

Заключение

Методический подход, представленный в работе, был оформлен в «Методические рекомендации по расчету допустимых погрешностей уровня, определению оправдываемости прогнозов и эффективности методов прогнозов дождевых паводков на реках Приморья» и представлен на заседании Технического совета Приморского УГМС. Техническим советом было принято решение (№ 1/24 от 09.02.2024) рекомендовать «Методические рекомендации» и полученные допустимые погрешности уровней к использованию в оперативной работе при оценке оправдываемости прогнозов дождевых паводков для рек бассейна р. Уссури (до п. Кировский).

Литература

1. Борщ С. В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Гидрологическая наука и практика XXI века // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 12. – С. 5–11.
2. Бугаец А. Н., Лупаков С.Ю., Гончуков Л.В., Соколов О.В., Сидоренко Н.Ю. Эффективность моделирования стока рек бассейна Верхней Уссури с использованием данных наблюдений и реанализа ERA5. // Метеорология и гидрология. – 2023. – С. 82–95.
3. Лупаков С. Ю., Бугаец А.Н., Гончуков Л.В., Соколов О.В., Бугаец Н.Д. Сопоставление компонентов стока, водного баланса и параметров концептуальных моделей HBV и GR4J на примере рек бассейна Верхней Уссури (юг Приморского края) // Водные ресурсы. – 2023. – Т. 50. – № 6. – С. 664–673.
4. Лупаков С.Ю., Бугаец А.Н., Гончуков Л.В., Мотовилов Ю.Г. , Соколов О.В., Бугаец Н.Д. Опыт применения концептуальной модели GR4J для расчета стока рек бассейна Уссури // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 2. – С. 57–68.
5. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. // Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 193 с.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР, Дальний Восток, Приморье. // Л.: Гидрометеиздат, 1972. – Т. 18. – Вып. 3. – 628 с.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРАКТИКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОБЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТАКСОНОМИЧЕСКИХ ГРУПП МАКРОЗООБЕНТОСА

Введение

Высокий уровень контаминации прибрежных акваторий РФ, отсутствие выраженных тенденций к снижению содержания загрязняющих веществ (ЗВ) и интенсивная экономическая эксплуатация этих районов обуславливает необходимость комплексного изучения морской среды. Ее мониторинг должен включать наблюдения как за факторами воздействия (загрязнениями), так и за состоянием элементов биосферы (откликами живых организмов на эти воздействия), за изменением их структурных и функциональных показателей [3, 33]. При этом контроль гидробиологических показателей является приоритетным, поскольку обеспечивает возможность прямой оценки состояния водных экосистем, испытывающих вредное влияние антропогенных факторов. Одним из наиболее эффективных методов оценки качества водной среды является наблюдение за уровнем загрязнения осадков и состоянием макрозообентоса. Кроме того, за рубежом в практике мониторинга среды наметилась тенденция к разработке показателей, снижающих стоимость и время, необходимое для получения результатов оценки ее состояния. При определении большинства гидробиологических показателей основные временные затраты приходится на таксономический анализ – идентификацию найденных животных до как можно более низкого, желательного видового, уровня, что занимает несколько недель, а то и месяцев.

Эффект от использования принципа таксономической достаточности был проверен Ж.-К. Довином с соавторами [25]. Снижение уровня идентификации с видового до родового уровня или уровня семейства уменьшает число таксонов соответственно на 37 и 65 %, а также сокращает время, проводимое в лаборатории (рис. 1).

Между значениями индекса Шеннона-Винера H' рассчитанными на видовом и родовом уровнях, наблюдается очень высокий уровень корреляции, а затем сила связи медленно снижается от рода к отряду. Такая же закономерность наблюдается и у других индексов. Например, коэффициент корреляции (r) между значениями $AMBI$, рассчитанными на видовом уровне и вычисленными на уровне рода, составляет 0,99; r на уровне вида и семейства уменьшается до 0,75, между видом и надсемейством – до 0,34 и между видом и отрядом – до 0,30.

В экологических и гидробиологических исследованиях традиционно применяется деление на так называемые таксономические группы. Для моллюсков и иглокожих (типы Mollusca и Echinodermata) – это классы Bivalvia, Gastropoda, Echinoidea, Asteroidea, Holothuroidea, Ophiuroidea и так далее, для ракообразных (подтип Crustacea) – это отряды Amphipoda, Decapoda, Isopoda, Cumacea, Cirripedia

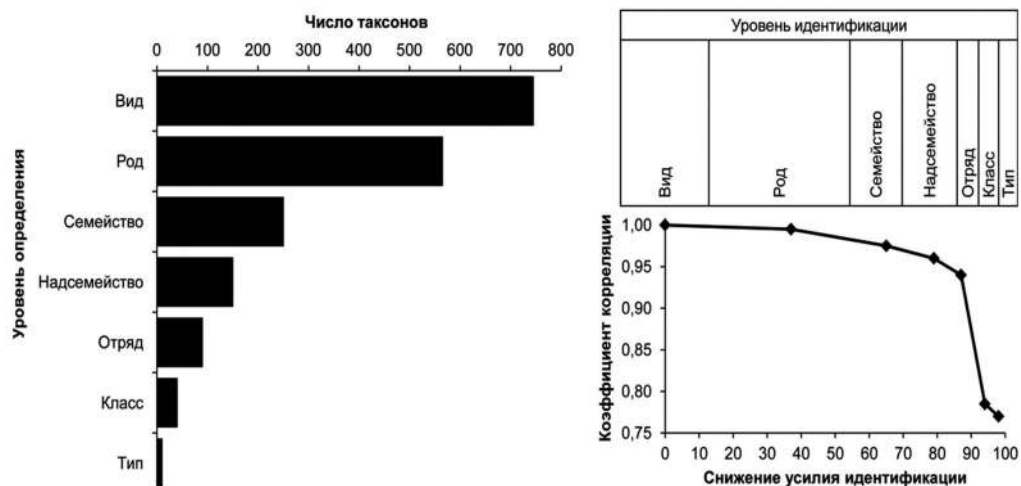


Рис. 1. Сокращение числа определяемых таксонов с видового уровня до уровня типа и соответствующее уменьшение усилия идентификации, по [25]

и другие. При этом на уровне класс-отряд снижение таксономического усилия составит 85–95 % (рис. 1). Поэтому попытка построения биомониторинга на этом уровне, по крайней мере, оправдана, учитывая существенное снижение как временных, так и экономических затрат. Последнее включает, например, подготовку, количество и состав специалистов, необходимых для выполнения оценки качества морской среды на основе биологических данных.

За рубежом для диагностики состояния морской (и эстуарной) среды применяются интегральные биотические индексы – *AMBI*, *M-AMBI*, *BENTIX*, *IBI*, *EVI*, *B-IBI*, *BEQI* и другие [21, 22, 25–27, 31, 34, 37–42, 44, 45]. Использование большинства из них регламентировано общими правилами Евросоюза, которые касаются экологического качества различных водоемов и сформулированы в Рамочной Директиве по водным ресурсам и Рамочной Директиве ЕС о морской стратегии [43]. Указанные параметры, образно говоря, являются одними из основных «инструментов», при помощи которых в ЕС определяется состояние морской среды и донного населения. Для применения этих индексов на некой «новой» акватории необходима их адаптация, что связано с видовым своеобразием донной фауны любого района Мирового Океана; ранее такая адаптация для зал. Петра Великого произведена у индексов *AMBI* и *M-AMBI* [12]. Индекс *AMBI*, по мнению его авторов, в наибольшей степени приспособлен для описания степени нарушения среды обитания макрозообентоса из-за загрязнения, *M-AMBI* – для характеристики его экологического состояния [24, 34]. В целом, индекс *M-AMBI* эквивалентен *BEQI*, который вычисляется усреднением *AMBI*, *R* и *H'*, нормализованным по их референтным для данной акватории величинам ($r^2 \sim 0,999$) [39]. Перечисленные биотические показатели требуют для своего вычисления детальной видовой идентификации. Однако существуют индексы, для определения которых такая идентификация не нужна. К таким показателям

относится биотический полихето-амфиподный индекс *ВОРА*, который рассчитывается как десятичный логарифм отношения нормализованной по плотности частоты встречаемости видов-оппортунистов многощетинковых червей к таковой всех разноногих раков [25].

Для характеристики общего уровня химического загрязнения донных отложений был предложен индекс TPF_{chem} , представляющий собой среднюю величину суммы ранжированных концентраций углеводов, фенолов, свинца, меди и ДДТ [1, 9, 19]. Эти элементы и соединения относятся к приоритетным ЗВ, а их набор для зал. Петра Великого определяется методами факторного анализа [1, 9, 15]. Распределение видов макрозообентоса вдоль градиента TPF_{chem} было изучено при помощи еНОВ моделей, что позволило создать классификацию животных по отношению к загрязнению [11]. На ее основе был разработан биоиндикационный индекс TPF_{bio} , настроенный на определение степени химического загрязнения грунтов [10].

Наконец, был разработан метод оценки степени антропогенного нарушения бентоса, основанный на зависимости изменений индекса Шеннона-Винера для двустворчатых моллюсков (H'_b) от TPF_{chem} [8, 9]. Показатели этих нарушений – координаты точек ERL_q и ERM_q ($TPF_{chem} = 2,8$ и $3,2$), которые ограничивают область прогрессивной деградации – почти линейного падения модели, описывающей изменения H'_b вдоль градиента TPF_{chem} . Кроме H'_b , были изучены вариации плотности поселения, биомассы, индексов видового богатства Маргалефа и выравненности Пиелу, а кроме бивалвий – еще и полихеты – на момент исследования только у этих двух групп имелись репрезентативные выборки. Модели изменения характеристик обилия многощетинковых червей и двустворчатых моллюсков имели куполообразную форму, что делало их непригодными для дальнейших построений. Снижение экологических индексов у полихет было близко к экспоненциальному, что также неприемлемо, и лишь у двустворок оно описывалось выраженными логистическими функциями, а максимальные коэффициенты детерминации показали индексы Маргалефа и Шеннона-Винера, которые, очевидно, и следует использовать для калибровки – определения координат ERL_q , ERM_q и ERD_q . Последняя точка – координата выхода кривой модели индекса H'_b на плато после своего падения (полное разрушение донного населения). Усовершенствованный метод такой калибровки с использованием функций кривизны модельной кривой и ее приращения представлен на рис. 2. Следует подчеркнуть, что, однажды откалибровав TPF_{chem} , в дальнейшем можно вообще отказаться от таксономических процедур и, если необходимо, использовать биологические данные только для детализации картины состояния макрозообентоса и степени его повреждения.

Таким образом, возможны четыре основных варианта применения в практике экологического мониторинга общих характеристик таксономических групп макрозообентоса:

1) По аналогии с индексом TPF_{bio} и основываясь на принципах и методике его построения, разработать индекс TPF_{gr} , используя параметры моделей распределения таксономических групп вдоль градиента TPF_{chem} ;

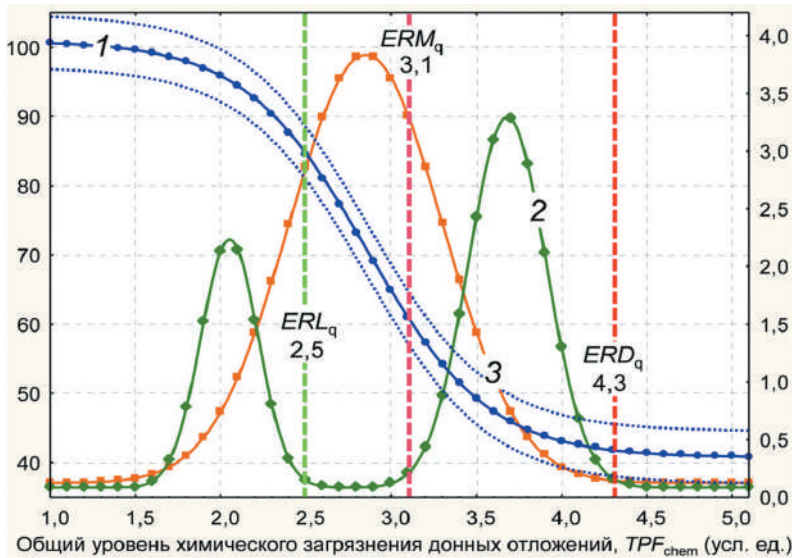


Рис. 2. Схема определения пороговых величин ERL_q , ERM_q и ERD_q по [15], модифицировано: 1, 2 и 3 – обобщенная функция состояния макрозообентоса (основная ось ординат), ее кривизна и приращение (дополнительная ось ординат). Точечные линии – 95 % доверительные границы, штриховые – положение искомым точек на модельной кривой, цифры – их координаты в единицах TPF_{chem}

2) Использовать групповые индексы $AMBI_{gr}$, $M-AMBI_{gr}$, вычисляемые по плотности поселения таксономических групп, основываясь на их классификации по отношению к содержанию органического углерода;

3) Пойти на компромисс и использовать методы, которые предполагают определение до видового уровня лишь небольшого числа таксономических групп; к таким показателям относится биотический полихето-амфиподный индекс $BOPA$;

4) Откалибровать TPF_{chem} по моделям изменения показателей видового богатства и разнообразия (индексы Маргалефа и Шеннона-Винера) с определением координат точек, ограничивающих линейное или почти линейное падение этих параметров.

Цель работы – проверить возможность применения в практике экологического мониторинга общих характеристик наиболее представительных таксономических групп макрозообентоса.

Материалы и методы исследований

Использованные материалы и анализ данных. В работе анализируются результаты комплексных экологических съемок ДВНИГМИ и ННЦМБ ДВО РАН (1992–2019 гг.) в зал. Петра Великого (заливы Посыета, Стрелок, Амурский и Уссурийский, акватория к северу от устья р. Туманной, пролив Босфор Восточный, бухты Рифовая, Патрокл, Золотой Рог, Диомид и Улисс). Методы сбора и камеральной обработки опубликованы ранее [12–14].

Общий уровень загрязнения характеризовали индексом

$$TPF_{chem} = (UB + FE + Pb + Cu + \Sigma ДДТ) / 5, \quad (1)$$

где UB, FE, Pb, Cu и $\Sigma ДДТ$ – пятиранговые оценки (*ln*-масштаб) содержания углеводов, фенолов, свинца, меди, суммы ДДТ и его метаболитов [1, 9, 15]. Вычисление TPF_{chem} производили при помощи программы TrfCalc, реализованной в среде STATISTICA. Для сравнения применяли биоиндикационный индекс TPF_{bio} [10]:

$$TPF_{bio} = \frac{\Sigma Opt_i}{N}, \quad (2)$$

где Opt_i – усредненная координата оптимума по TPF_{chem} для групповой встречаемости и плотности каждого таксона, N – число расклассифицированных таксонов.

Кроме частоты встречаемости, плотности поселения и биомассы (далее – F_q , A и B), использовали упрощенный индекс видового богатства Маргалефа (число видов на станции или в пробе, R) и индекс видового разнообразия Шеннона-Винера (H'):

$$H' = -\Sigma (p_i \cdot \log_2 p_i), \quad (3)$$

где p_i – доля вида i от общей плотности. Вычисления биотических характеристик выполняли при помощи ППП PRIMER5.0.

Для характеристики экологического состояния макрозообентоса использовали индексы *AMBI* (AZTI Marine Biotic Index) и *M-AMBI* [21, 22, 34]. Для их вычисления существует программное обеспечение, свободно распространяемое в интернете (последняя версия – 6.0, база данных – май 2022 г.) [24]. Первый определяется по сумме удельных плотностей пяти групп видов, по-разному относящихся к содержанию органического углерода (C_{opt}) в донных отложениях:

$$AMBI = [(0 \times \%GI) + (1.5 \times \%GII) + (3 \times \%GIII) + (4.5 \times \%GIV) + (6 \times \%GV)] / 100, \quad (4)$$

где GI–GV – группы видов.

Необходимый для расчёта *AMBI* список видов и таксонов более высокого ранга зал. Петра Великого, расклассифицированных по указанным группам, опубликован ранее [14].

Второй индекс, *M-AMBI* или *Multivariate AMBI*, вычисляется на основе процедуры факторного анализа с использованием индексов *AMBI*, R и H' [34].

Кроме того, в работе использован биотический полихето-амфиподный индекс *ВОРА*, определяемый на основе плотности амфипод и оппортунистических видов полихет по формуле [25]:

$$ВОРА = \log_{10} \left(\frac{fp}{fa + 1} + 1 \right), \quad (5)$$

где fp – частота встречаемости оппортунистических полихет, т. е. отношение числа оппортунистических полихет к общему числу особей в выборке; fa – частота встречаемости амфипод, т. е. отношение числа амфипод к общему числу особей

в выборке. Два члена «+1» в уравнении необходимы для выполнения операции деления и логарифмического преобразования, если fp или fa равны нулю.

Для определения критических уровней состояния макрозообентоса (пороговых величин ERL_q , ERM_q и ERD_q) использовали кривизну модельных кривых, которую вычисляли по формуле:

$$K = \frac{y''(x)}{(1 + y'^2)^{3/2}}, \quad (6)$$

где y' и y'' – первая и вторая производные уравнений регрессии.

Максимум K соответствует точке перегиба функции, а начало ее увеличения после достижения минимума – замедлению роста параметра и началу выхода кривой на плато. Вычисление кривизны производили при помощи программы *CurvLog*, разработанной для логистических моделей в среде STATISTICA.

Статистический анализ. Для описания распределения групп вдоль градиента загрязнения использовали иерархические модели логистической регрессии Хаусмана-Олфа-Фреско (НОФ), реализованные в модуле *eNOF* статистической среды R [28–30, 36]. Считается, что эти модели позволяют наиболее гибко учитывать всю совокупность априорных исходных ограничений и теоретических предположений, традиционно связываемых с характером кривых отклика (далее – КО), и, вероятно, предоставляют наилучший результат с экологической точки зрения [18]. Всего существует семь типов моделей возрастающей сложности. Модель I типа представляет собой «плоский ответ», означающий отсутствие значимого тренда в обилии вида вдоль градиента фактора среды. Модель II типа выражается монотонным сигмоидом с вершиной на одном из концов градиента, КО III типа также является монотонным сигмоидом, но имеет плато ниже максимального верхнего значения. Кривая IV типа отражает классическую форму видовой отклика – одновершинную симметричную модель, V – унимодальную асимметричную модель, а КО VI и VII типов имеют по два оптимума, причем у шестой они одинаковы.

Выбор модели, описывающей распределение вида вдоль градиента фактора среды в наилучшей степени, производится на основе оценок стандартных отклонений и информационных критериев Акаике и Байеса (AIC и BIC, по желанию). К сожалению, у *eNOF* моделей есть один существенный недостаток – в выборке у группы должно присутствовать как минимум 10 ненулевых значений. Поэтому для таксонов, найденных на 5–9 станциях, в выборку с помощью генератора случайных чисел внутри диапазона встречаемости для A и B были добавлены значения 0,1 % (для $F_q - 1$).

Для классификации таксономических групп по отношению к уровню загрязнения применяли процедуру, основанную на теории нечетких множеств (далее – НМ, метрика – евклидово расстояние) [17]. Этот метод использует коэффициент разделения Данна и предполагает, что каждый объект принадлежит к нескольким кластерам сразу, но «притягивается» к ним с разной силой [18]. Предварительно, для определения приблизительного количества групп, использовали различные

варианты кластерного анализа [5]. Статистическую значимость разбиения на группы оценивали на основе пермутационного теста ANOSIM с вычислением общей статистики R (нулевая гипотеза H_0 – агломерация отсутствует) [40].

Кроме того, в работе использован линейный регрессионный анализ и нелинейное оценивание, с вычислением коэффициента корреляции (r), параметров регрессии (b_i) и их статистической оценкой (ANOVA и проверка $H_0: r = 0$ – влияние фактора «модель» отсутствует, $b_i = 0$) [2, 4]. Нелинейное оценивание производили последовательным применением (по необходимости, если предыдущий вариант не давал решения) алгоритмов Квази-Ньютона, Симплекс, Хука-Дживза или Розенброка (предварительное вычисление коэффициентов модели), Гаусса-Ньютона или Левенберга-Марквардта (статистическая оценка коэффициентов и ANOVA) и на последнем этапе – при помощи процедуры рандомизации сигмоидальной функции [16]. При сравнении моделей использован непараметрический аналог t -критерия для зависимых выборок – тест Вилкоксона (проверяется нулевая гипотеза H_0 – значения двух переменных имеют одно и то же распределение). Для проверки данных на соответствие нормальному распределению и равенство внутригрупповых дисперсий (гомоскедастичность) применяли тесты Шапиро-Уилка и Ливина (H_0 – распределение соответствует нормальному и данные гомоскедастичны), а для трансформации результатов наблюдений – алгоритм Бокса-Кокса, реализованный в пакете AID среды R [6, 35].

Распределение таксономических групп макрозообентоса вдоль градиента загрязнения в заливе Петра Великого и построение индекса TPF_{gr}

На исследованных акваториях зал. Петра Великого найдено 30 таксономических групп макрозообентоса; абсолютная встречаемость в пять раз и более наблюдалась у 22 из них (табл. 1). Для F_q , A и B этих животных были получены 65 кривых отклика (у Hydrozoa плотность поселения неопределима), модели I типа не были обнаружены (у полихет кривая отклика встречаемости весьма близка к этому типу), а во всех случаях преобладали кривые отклика IV и V типа (рис. 3).

Это классические для экологии симметричные колоколообразные функции с одним оптимумом, двумя субоптимумами и пессимумами и унимодальные асимметричные модели (обычно в левую сторону, за исключением таковых у форонид, полихет и приапулид, рис. 4–6).

У встречаемости чаще всего наблюдались кривые отклика IV типа, затем следовали модели III, далее, с равной частотой, – II и V типов, и в одном случае – у офиур – VII, КО VI типа отмечены не были. Для плотности по частоте появления первыми были кривые отклика пятого типа, вторыми – четвертого, затем – по убывающей – модели третьего, шестого – седьмого и второго типов. У моделей биомасс лидировали КО IV и V типа, наблюдавшиеся с равной частотой, два раза были отмечены модели II типа и по одному – III и VI.

Кривые отклика всех найденных типов по форме весьма разнообразны. Даже классические колоколообразные КО (модели IV типа) часто были сильно

Таблица 1. Некоторые характеристики таксономических групп макрозообентоса и типы полученных eHOF моделей

Таксон	Абсолютная F_q	Тип модели		
		F_q	<i>A</i>	<i>B</i>
Actiniaria	41	IV	VI	V
Amphipoda	129	IV	III	III
Anthozoa	2	–	–	–
Ascidia	19	IV	V	IV
Asteroidea	47	II	V	IV
Bivalvia	240	III	V	V
Cirripedia	12	V	IV	V
Copepoda	1	–	–	–
Cumacea	79	IV	III	IV
Decapoda	88	IV	V	IV
Echinoidea	30	III	V	V
Echiurida	6	IV	IV	II
Gastropoda	168	IV	V	V
Hirudinea	2	–	–	–
Holothuroidea	14	III	III	IV
Hydrozoa	7	IV	–	IV
Insecta	2	–	–	–
Isopoda	23	II	II	IV
Leptostraca	3	–	–	–
Mysida	10	II	IV	II
Nemertea	172	V	V	V
Ophiuroidea	152	VII	VI	VI
Pantopoda	3	–	–	–
Phoronida	41	V	V	V
Polychaeta	273	II	VII	V
Priapulida	27	V	VII	V
Sipuncula	30	III	V	IV
Solenogastres	14	III	IV	IV
Spongia	1	–	–	–
Stomatopoda	3	–	–	–

асимметричны, причем до такой степени, что точка, отделяющая области оптимума и субоптимума, отсутствовала (КО встречаемости у гастропод, плотности у мизид) (рис. 3–6). Модели V типа по форме иногда были почти идентичны таковым четвертого (КО встречаемости и биомассы усоногих раков, плотности у асцидий, биомассы у актиний). У всех моделей VI и VII типов «двухвершинность» не была выражена, а КО плотности и биомассы офиур (VI тип) могли бы быть описаны и моделями II типа.

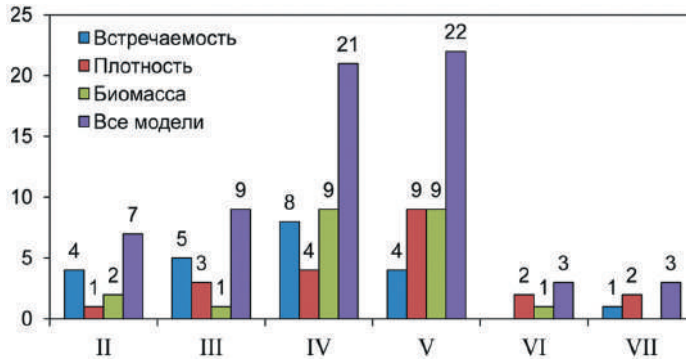


Рис. 3. Результаты eNOF моделирования: типы моделей, полученные при анализе встречаемости и характеристик обилия

Основными параметрами кривых отклика, которые характеризуют распределение таксона вдоль градиента фактора среды, являются ширина внешней и центральной ниш, положение оптимума и субоптимумов (рис. 7). Размер ниш характеризует степень бионтности таксона: чем они уже, тем он более стенобионтен, и наоборот. Ширина внешней и центральной ниш, как для встречаемости, так и для плотности поселения и биомассы, заметно коррелируют друг с другом (коэффициент детерминации $r^2 = 0,785, 0,867$ и $0,946, p = 0,000$), но форма зависимостей и наклон линий регрессии явно определяется типом модели (рис. 8). Например, соотношение размеров ниш у модели III типа в большинстве случаев близко к единице, а линия регрессии – к таковой для равенства центральной и внешней ниш; зависимость для КО третьего типа явно линейная, а у четвертого и пятого – экспоненциальная или полиномиальная (полином третьей степени).

В контексте настоящего исследования наиболее важными являются следующие параметры:

- 1) среднее значение – среднее от измеренных величин TPF_{chem} в пределах диапазона встречаемости таксона по этому параметру;
- 2) координата оптимума – наивысшего отклика (максимума модели) в диапазоне TPF_{chem} ;
- 3) координата точек перегиба – границ между оптимумом и субоптимумом (точки, в которой выпуклая часть функции отделяется от вогнутой).

К сожалению, обе точки перегиба нельзя определить у сильно асимметричных моделей, причем даже IV и V типов – когда одна из них выпадает из области определения TPF_{chem} . У моделей II и III типов такая точка вообще одна, а у VI и VII их должно быть по четыре (теоретически). Поэтому сформулировать правило выбора такого параметра для дальнейшего анализа не представляется возможным. Диапазон изменений положения точки среднего значения существенно уже, чем у оптимума, что снижает его ценность для характеристики распределения групп вдоль градиента TPF_{chem} . Поэтому для построения индекса TPF_{gr} использовали именно координаты точек оптимума КО для F_q, A и B (значение TPF_{chem} , на которое она приходится).

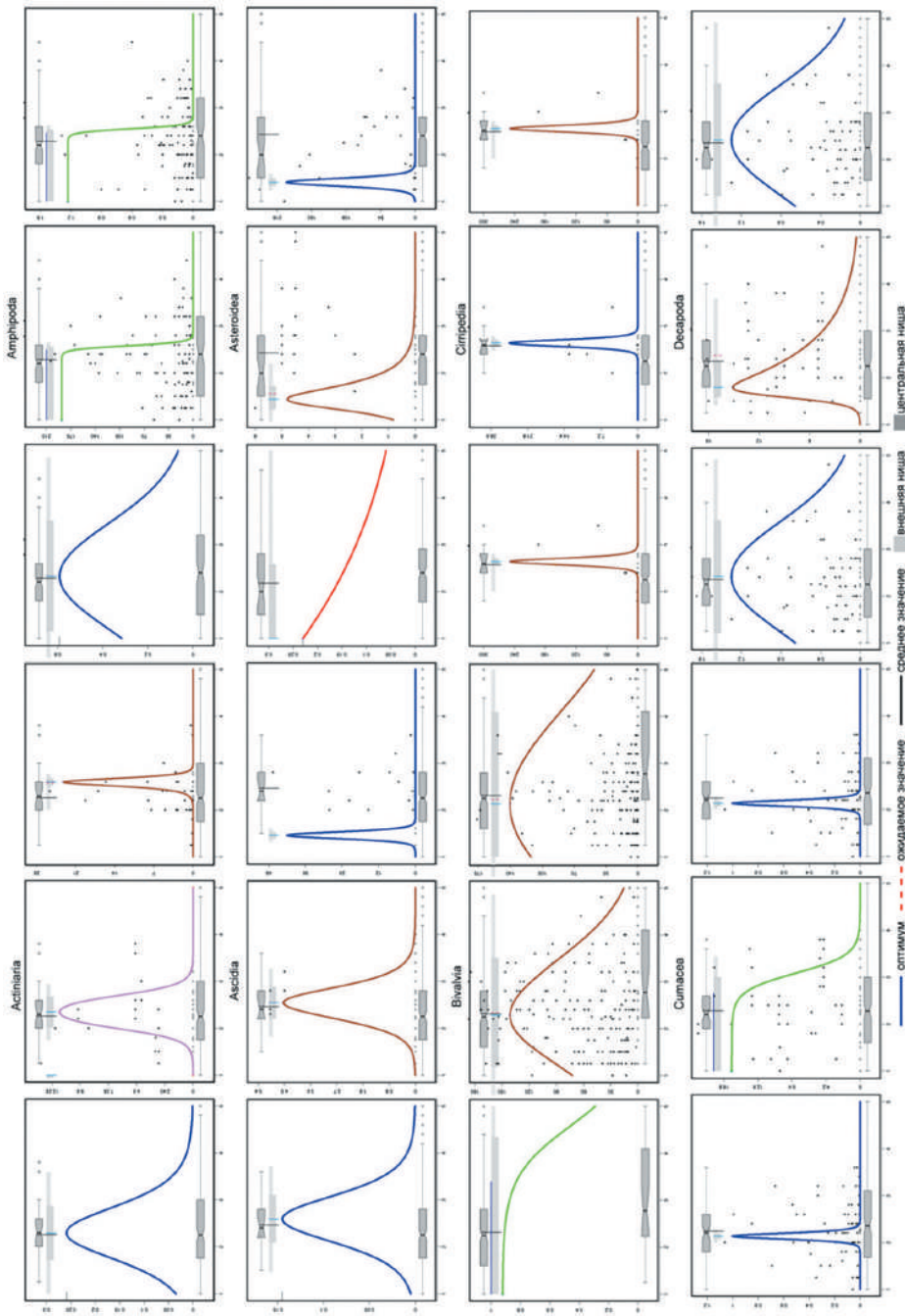


Рис. 4. Распределение групп макрозообентоса вдоль градиента загрязнения. Ось абсцисс – TRF_{chem} (усл. ед.), ось ординат – встречаемость, плотность и биомасса (соответственно 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 столбцов, доли, экз./м² и г/м²)

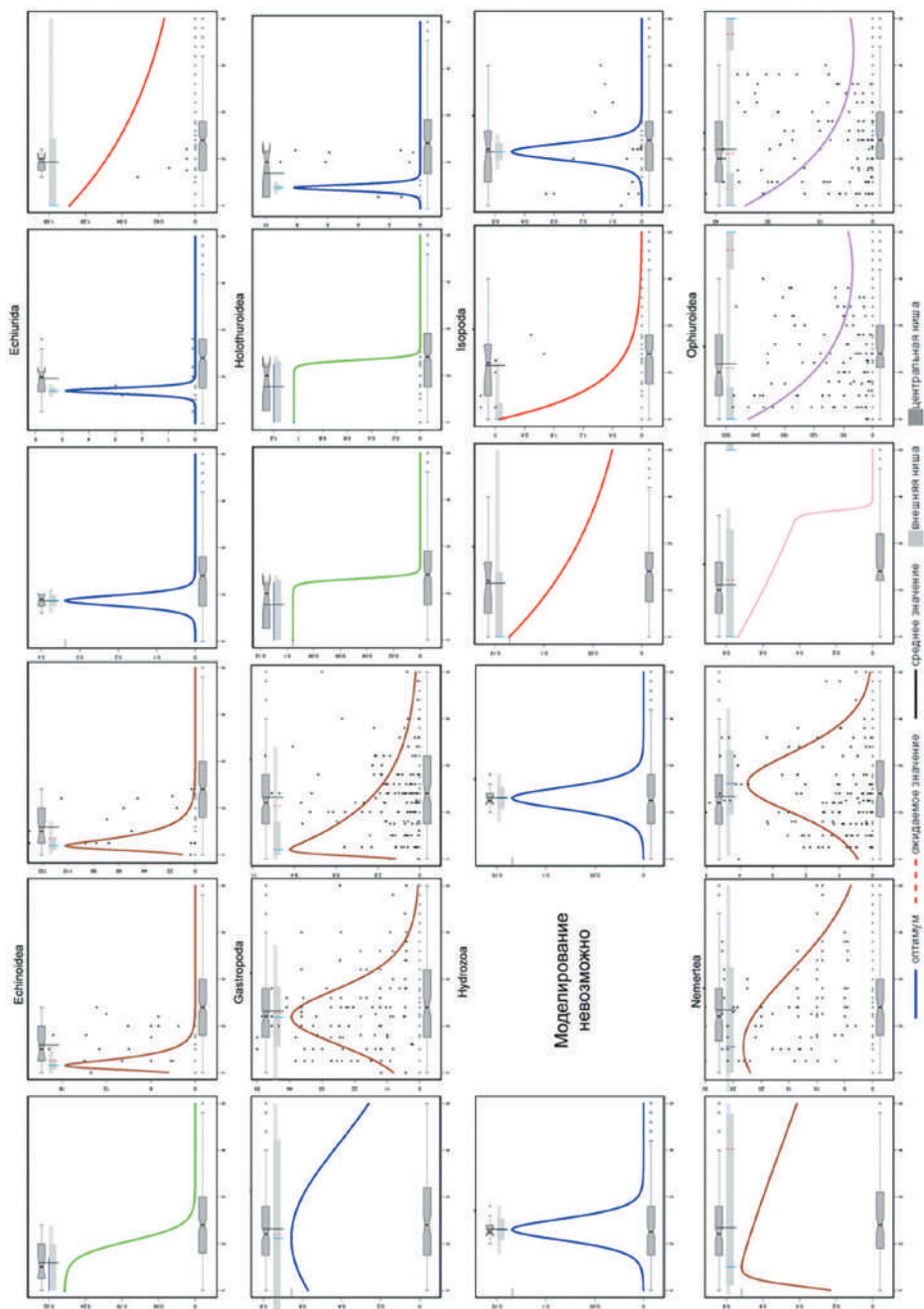


Рис. 5. Распределение групп макрозообентоса вдоль градиента загрязнения. Ось абсцисс – TRF_{chem} (усл. ед.), ось ординат – встречаемость, плотность и биомасса (соответственно 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 столбцов, доли, экз./м² и г/м²)

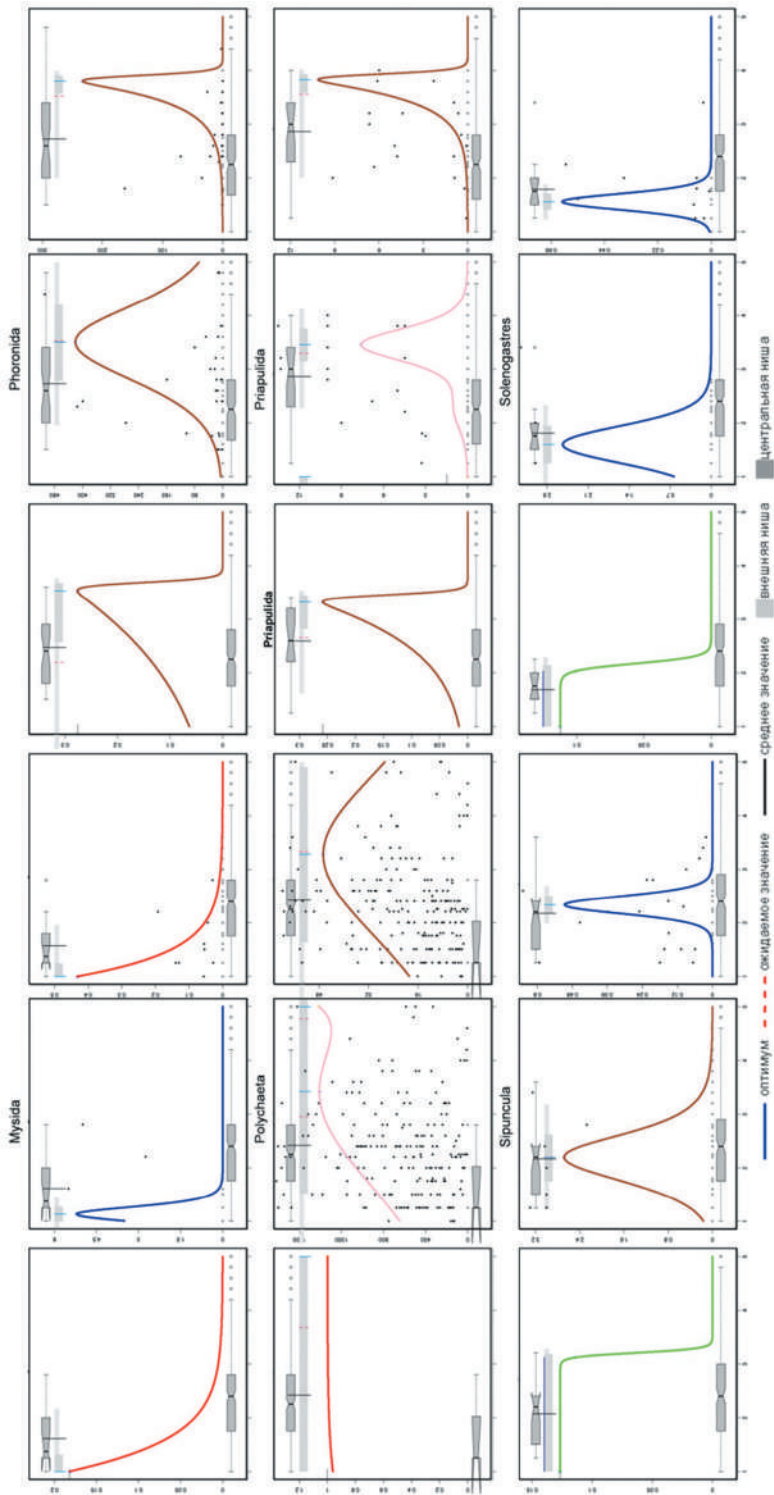


Рис. 6. Распределение групп макрозообентоса вдоль градиента загрязнения. Ось абсцисс – TRF_{chem} (усл. ед.), ось ординат – встречаемость, плотность и биомасса (соответственно 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 столбцов, доли, экз./м² и г/м²)

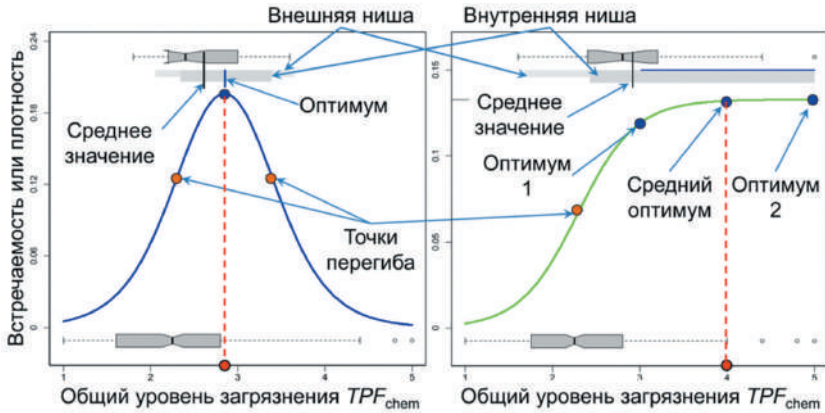


Рис. 7. Схема анализа кривых отклика и наиболее перспективные показатели для классификации таксономических групп по отношению к загрязнению

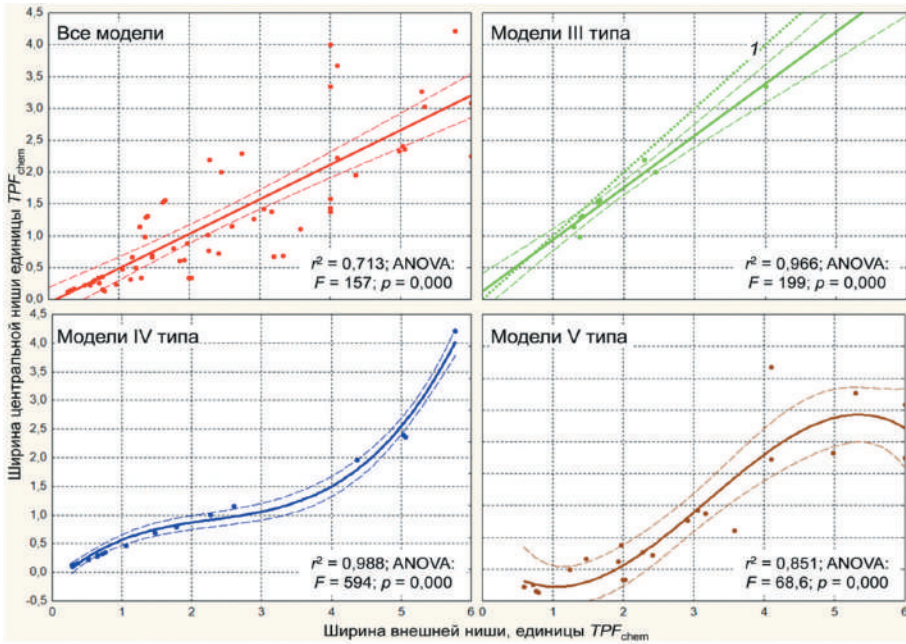


Рис. 8. Связь ширины центральной и внешней ниши: 1 – размеры ниш одинаковы

Кривые отклика, которые описываются моделями VI и VII типа, включали положение основного экстремума, а таковые III – средний оптимум (рис. 7).

$$\text{Для каждой станции (пробы) вычисляем } TPF_{gr} = \frac{\sum Opt_i}{N},$$

где Opt_i – оптимум по TPF_{chem} для F_q , A и B каждой группы; N – число расклассифицированных групп, найденных на станции (в пробе). В результате регрессионного анализа (предиктор TPF_{chem} , зависимые переменные

TPF_{gr} , вычисленные на основе F , A , B и их усредненного значения) объясненная дисперсия составила всего 0,7 % – 14,5 % с ее максимальной величиной у плотности и минимальной – у усредненных значений (рис. 9). Какое-либо ее увеличение за счет исключения выбросов не представляется возможным. Например, удаление таковых у встречаемости (три точки в первой половине области определения TPF_{chem} с минимальными значениями TPF_{gr}) ведет к снижению объясненной дисперсии почти на процент.

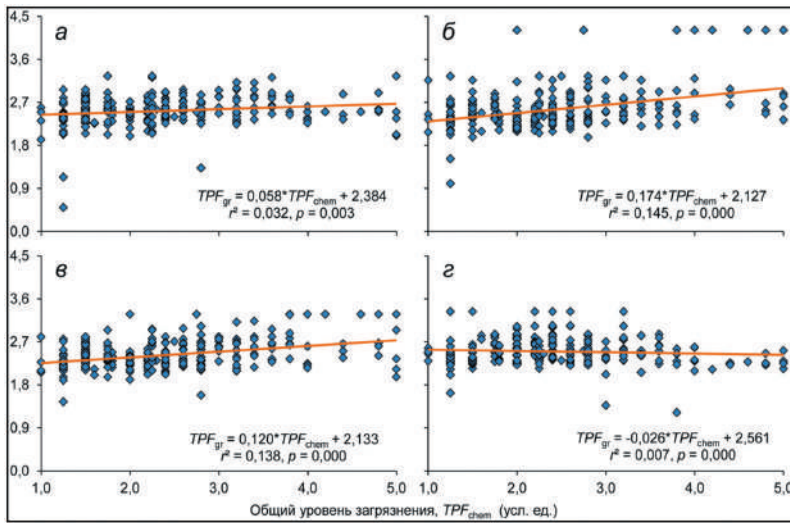


Рис. 9. Результаты регрессионного анализа. Ось ординат: а, б, в и г – соответственно величины индекса TPF_{gr} , вычисленные по оптимумам встречаемости, плотности, биомассе и его усредненная величина; r – коэффициент корреляции, p – вероятность справедливости H_0

Таким образом, анализ кривых отклика 22 таксономических групп макрозообентоса не позволяет разработать показатель, аналогичный TPF_{bio} , который, в отличие от TPF_{gr} , довольно «чутко» реагирует на изменения общего уровня химического загрязнения среды – TPF_{chem} (для сравнения: объясняемая дисперсия у TPF_{bio} на этом этапе анализа данных составляла 65,1 % – 67,7 %). В то же время остается вероятность получить приемлемые результаты после классификации таксономических групп с последующим вычислением TPF_{gr} на ее основе.

Классификация таксономических групп по отношению к уровню загрязнения

Классификация животных по отношению к загрязнению позволила увеличить дисперсию TPF_{bio} , объясняемую вариациями TPF_{chem} почти на 10 % (с 65,1 % – 67,7 % до 74,2 % – 75,3 %), что было достигнуто снижением индивидуальной (на уровне вида, рода, семейства) изменчивости координат точек оптимумов [10].

Для классификации таксономических групп используем координаты положения средних и оптимумов для КО встречаемости, плотности и биомассы (всего

четыре параметра) и алгоритм, основанный на теории НМ. Предварительно выполненный кластерный анализ указывает на наличие трех групп донных животных (не показано). Применение алгоритма НМ позволяет объединить животных именно в три кластера, причем такое разбиение подтверждается общими и частными результатами процедуры ANOSIM (табл. 2, рис. 10).

На рис. 10 красным показаны т. н. дискриминационные линии, проведенные от руки. К сожалению, трансформация данных не позволила достигнуть соответствия нормальному распределению и гомоскедастичности, что исключило возможность применения дискриминантного анализа (результаты теста Шапиро-Уилка и Ливина после трансформации: вероятность справедливости $H_0 p = 0,000$ во всех случаях).

Кроме еще одного подтверждения полученной ординации, последняя процедура дала бы возможность получить математическое выражение для

Таблица 2. Результаты нечеткой классификации таксономических групп – степень принадлежности таксонов к выделенным кластерам (экспоненциальный вес – 1,2), типы моделей и бионтность

Группа	Кластер	Кластер			Тип модели			Бионтность		
		I	II	III	F_q	A	B	F_q	A	B
Actiniaria	II	0,000	1,000	0,000	IV	VI	V	SE	St	St
Amphipoda	II	0,000	1,000	0,000	IV	III	III	Eu	St	St
Ascidia	II	0,000	1,000	0,000	IV	V	IV	SE	St	St
Asteroidea	I	1,000	0,000	0,000	II	V	IV	Eu	St	SE
Bivalvia	II	0,000	1,000	0,000	III	V	V	Eu	Eu	Eu
Cirripedia	III	0,000	0,022	0,978	V	IV	V	St	St	St
Cumacea	II	0,000	1,000	0,000	IV	III	IV	Eu	SE	St
Decapoda	II	0,000	1,000	0,000	IV	V	IV	Eu	SE	Eu
Echinoidea	I	1,000	0,000	0,000	III	V	V	St	St	St
Echiurida	I	0,999	0,001	0,000	IV	IV	II	St	St	Eu
Gastropoda	II	0,024	0,976	0,000	IV	V	V	Eu	SE	SE
Holothuroidea	I	1,000	0,000	0,000	III	III	IV	St	St	St
Hydrozoa	II	0,000	1,000	0,000	IV	–	IV	St	–	St
Isopoda	I	0,999	0,001	0,000	II	II	IV	Eu	St	St
Mysida	I	1,000	0,000	0,000	II	IV	II	St	St	St
Nemertea	II	0,007	0,993	0,000	V	V	V	Eu	Eu	SE
Ophiuroidea	III	0,000	0,000	1,000	VII	VI	VI	SE	SE	SE
Phoronida	III	0,000	0,000	1,000	V	V	V	Eu	SE	SE
Polychaeta	III	0,000	0,000	1,000	II	VII	V	Eu	Eu	Eu
Priapulida	III	0,000	0,000	1,000	V	VII	V	St	SE	SE
Sipuncula	II	0,000	1,000	0,000	III	V	IV	SE	SE	St
Solenogastres	I	1,000	0,000	0,000	III	IV	IV	St	St	St

Примечание. F_q , A и B – частота встречаемости, плотность и биомасса, St, Eu и SE – стено-, эври- и стено-эврибионты; жирным шрифтом выделены значения, указывающие на принадлежность к соответствующему кластеру, прочерк – моделирование невозможно.

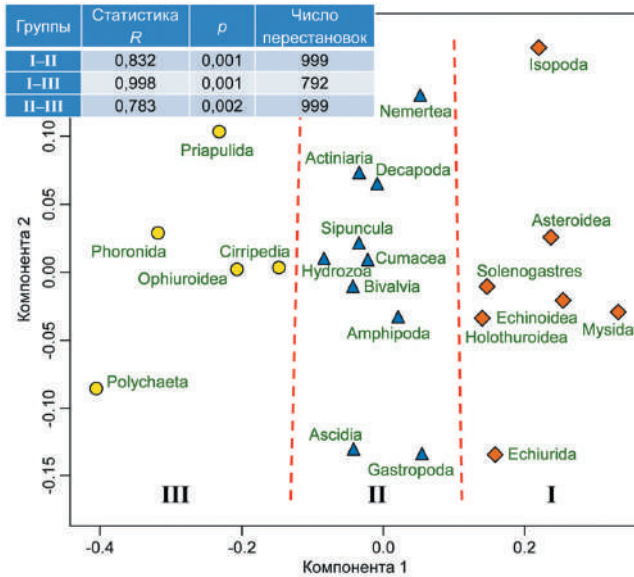


Рис. 10. Нечеткая классификация таксономических групп (компоненты объясняют 95,7 % дисперсии точек; ANOSIM – $R = 0,826$, $p = 0,001$) и частные результаты процедуры ANOSIM. Группы обозначены римскими цифрами, p – вероятность справедливости H_0

классификации других таксонов при поступлении новых данных и выполнить статистическую оценку вероятности их вхождения в тот или иной кластер.

В I–III агломерации вошли соответственно семь, десять и пять групп, и, таким образом, всего были расклассифицированы все 22 таксономических подразделения этого ранга, пригодные для eNOF моделирования. Естественно, в первой и третьей группах преобладают соответственно сильно лево- и право-асимметричные модели, причем для встречаемости – это кривые отклика II и III типа (рис. 11). В группе II степень смещения точки оптимума в ту или другую сторону снижается, и доминируют модели четвертого и пятого типов.

Кривые отклика, полученные на основе объединенных внутри групп данных по частоте встречаемости, плотности и биомассы (в двух последних случаях данные предварительно были нормализованы по наибольшим значениям и выражены в процентах от максимума) представлены почти всеми типами моделей, кроме первой и шестой (рис. 12, табл. 2). Модель II типа описывает встречаемость

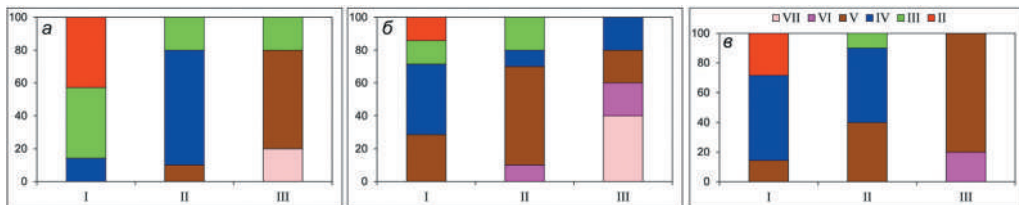


Рис. 11. Состав выделенных групп по типам моделей: а, б и в – соответственно встречаемость, плотность поселения и биомасса

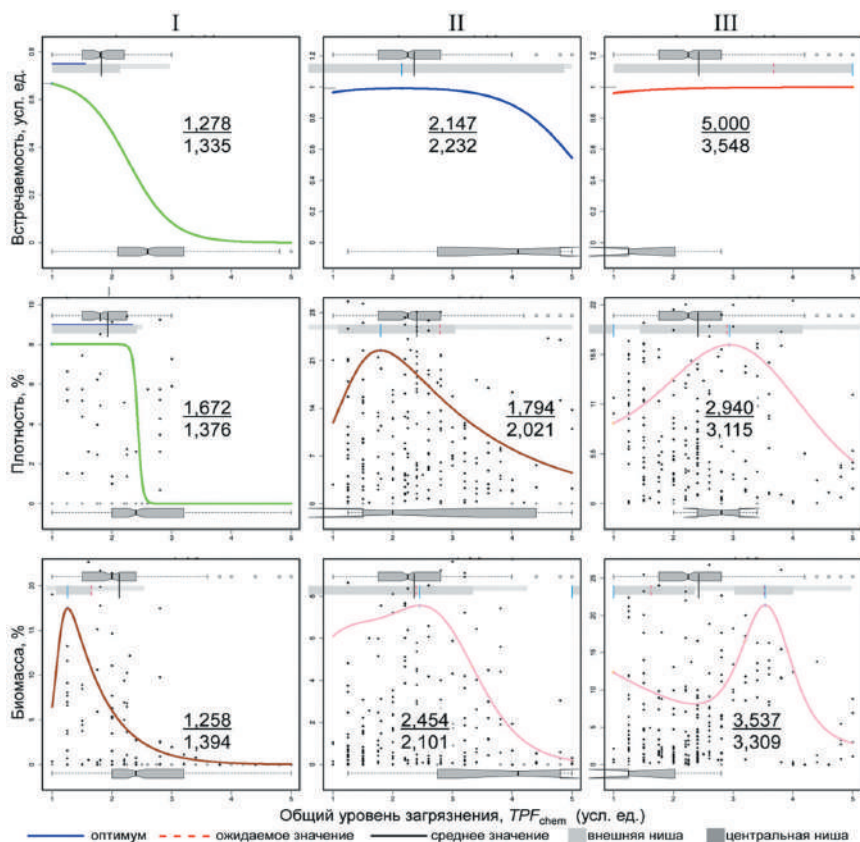


Рис. 12. Результаты классификации таксономических групп (группы I–III): кривые отклика, полученные на основе объединенных внутри групп данных по F_q , A и B . Цифры внутри диаграмм – координаты точки оптимума вдоль градиента TPF_{chem} (усл. ед.; в числителе – оптимумы моделей, в знаменателе – оптимумы, усредненные внутри групп)

в третьем кластере, причем эта кривая отклика весьма близка по форме к таковой I типа. Лево-асимметричные модели III типа характеризуют изменения встречаемости и плотности в первом кластере, IV – встречаемости во втором, V – биомассы в первом и плотности во втором, VII – плотности во втором и плотности и биомассы в третьем.

Координаты оптимумов моделей и таковые, полученные путем внутригруппового усреднения, близки у КО встречаемости первого и второго кластера (различия $< 0,1$ единицы TPF_{chem}) и существенно отличаются у остальных КО с максимумом у встречаемости третьей агломерации (почти полторы единицы TPF_{chem}).

Для экологической интерпретации полученных групп необходимо вернуться к вопросу о размере ниш исследованных таксонов, т. е. к пределам их толерантности относительно уровня химического загрязнения грунтов. Так как ширина внешней и ширина центральной ниши заметно коррелируют друг с другом, можно оставить один показатель, при этом первый из них более предпочтителен, т. к.

полнее отражает встречаемость того или иного таксона вдоль градиента TPF_{chem} . По размеру внешней ниши для плотности всех 22 таксономических групп, проранжировав ее значения на три класса, получаем 11 явных стенобионтных групп, три – эврибионтных и семь стено-эврибионтных (рис. 13).

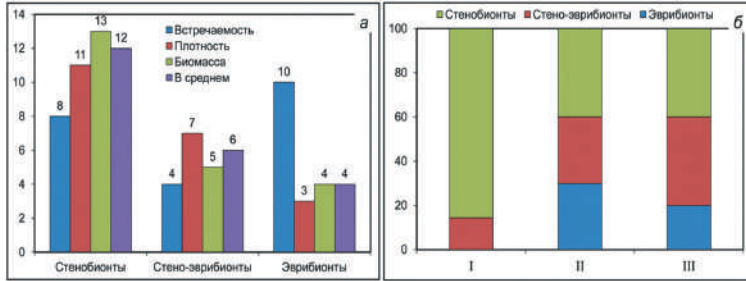


Рис. 13. Градации таксономических групп макрозообентоса по размеру внешней ниши и состав групп по степени бионтности (соответственно, а и б)

У встречаемости распределение по этим классам более равномерное – соответственно восемь, четыре и десять таксонов, у биомассы – менее: 13, пять и четыре. Следует подчеркнуть, что понятие бионтности в отношении таксономических групп весьма условно, поскольку многие из них на акватории зал. Петра Великого насчитывают десятки, а то и сотни видов, у которых координаты оптимумов весьма различны.

Так как все распределения показателей весьма неравномерны, в отличие от таковых для таксонов более низкого ранга (видов, родов, семейств), у которых явное предпочтение можно было отдать встречаемости, для классификации бионтности используем усредненные градации. Стенобионтные по отношению к загрязнению животные преобладают в I группе, а эврибионты – отсутствуют (рис. 13). Во II и III кластере соотношение разных по выносливости групп примерно одинаково. Таким образом, первый кластер объединяет чистолюбивых (чувствительных к уровню загрязнения), в основном стенобионтных организмов, вторая и третья – умеренно чистолюбивых и толерантных к загрязнению представителей донной фауны, причем последние включают и оппортунистов II и I порядка. Эти животные встречаются почти во всем диапазоне TPF_{chem} , но получают преимущество на умеренно и сильно загрязненных участках, т. е. на фоне вырождения бентосного населения.

Итак, с экологической точки зрения, выполненный анализ позволяет описать выделенные группы следующим образом:

– нетолерантные к загрязнению, обычно стенобионтные, реже стено-эврибионтные животные. К первым относятся Asteroidea, Echinoidea, Echiurida, Holothuroidea, Mysida и Solenogastres, ко вторым – Isopoda;

– умеренно толерантные, стенобионтные, стено-эврибионтные и эврибионтные представители макрозообентоса. К первым относятся Actiniaria, Ascidia, Hydrozoa и Sipuncula, ко вторым – Amphipoda, Cumacea и Gastropoda, к третьим – Bivalvia, Decapoda и Nemertea;

– толерантные, стенобионтные, стено-эврибионтные и эврибионтные животные. Первые включают Cirripedia и Priapulida, вторые – Ophiuroidea и Phoronida, третьи – Polychaeta.

При вычислении индекса TPF_{bio} среди различных вариантов расчётов наиболее эффективным оказалось использование среднегрупповых оптимумов кривых отклика [10]. При определении TPF_{gr} , кроме этого, логично также исключить эври- и эври-стенобионтные таксономические группы (рис. 14).

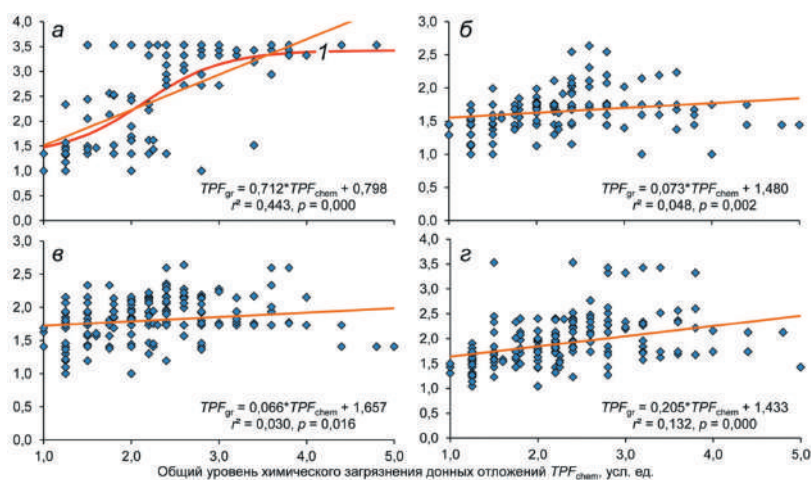


Рис. 14. Результаты регрессионного анализа. Ось ординат: а, б, в и г – соответственно величины индекса TPF_{gr} стенобионтных групп, вычисленные по оптимумам встречаемости, плотности, биомассе и его усредненная величина; r – коэффициент корреляции, p – вероятность справедливости H_0 ; 1 – логистическая функция (см. текст)

Например, включение в построения эврибионтных полихет, встречающихся почти на всех станциях, добавит в вычисления оптимум с координатой 5,0, что приведет к неоправданному росту искомого показателя.

При использовании среднегрупповых оптимумов и указанных ограничений объясняемая предиктором TPF_{chem} дисперсия TPF_{gr} возрастает для встречаемости и усредненных значений соответственно в 14 и 19, а для плотности и биомассы – уменьшается в 3 и 5 раз (рис. 14). Более того, изменения TPF_{gr} для встречаемости стало возможным описать логистической функцией (как наиболее приемлемой с экологических позиций), что увеличило объясняемую дисперсию почти до 50 % ($r^2 = 0,476$, $p = 0,000$). Однако этого явно недостаточно и, следовательно, индекс TPF_{gr} , разработанный на основе принципов и методики построения TPF_{bio} , в отличие от последнего, непригоден как для практики экологического мониторинга, так и для каких-либо других, например, теоретических целей.

Групповые индексы $AMBI_{gr}$ и $M-AMBI_{gr}$

Величины индексов $AMBI_{gr}$ и $M-AMBI_{gr}$ были рассчитаны на основе собственных результатов eNOF моделирования; многощетинковые черви были отнесены к индифферентным животным (группа II при определении $AMBI$). За рубежом

процедура проверки соответствия разных индексов весьма распространена и носит название интеркалибровки, или калибровки. Ниже представлены результаты такой калибровки – сопоставления индексов $AMBI$ и $M-AMBI_{gr}$ со стандартными индексами $AMBI$ и $M-AMBI$, а также TPF_{chem} и TPF_{bio}^{gr} (рис. 15).

Доля объясненной вариациями предикторов TPF_{chem} , TPF_{bio} , $AMBI$ и $M-AMBI$ дисперсии у индекса $AMBI_{gr}$ составляет соответственно 5,2; 8,3; 1,9 и 2,5 % при аппроксимации полиномом второй степени и линейной регрессией (рис. 15). При этом попытка улучшить результаты за счет исключения выбросов оказалась неудачной, и удаление явных аутбрейков (к тому же, непонятно, какие значения $AMBI_{gr}$ к ним отнести) лишь уменьшало ее величину. Несколько лучшие результаты дает калибровка $M-AMBI_{gr}$: коэффициент детерминации для указанных независимых переменных здесь достигает 18,7; 34,7; 22,4 и 33,3 % при использовании полинома третьей степени и удалении трех-пяти отчетливо выпадающих значений предиката (рис. 15).

При калибровке индексов, применяемых в ЕС, коэффициент детерминации варьирует в пределах 6–84 % [20, 23, 24]. Объясненные для индекса $M-AMBI_{gr}$ 18,7–34,7 % дисперсии хорошо вписываются в этот ряд, а ее 1,9–8,3 % у $AMBI_{gr}$ в большинстве случаев располагаются за его нижней границей. Таким образом, наши результаты довольно хорошо согласуются с данными зарубежных исследователей, однако доля объясненной дисперсии во всех случаях крайне низка. Поэтому групповые индексы $AMBI_{gr}$ и $M-AMBI_{gr}$ непригодны для мониторинга и биоиндикации и, следовательно, использование таксономических групп невозможно и в таком варианте.

Биотический полихето-амфиподный индекс *ВОРА*

Индекс *ВОРА* не требует для своего вычисления детальной видовой идентификации всех таксономических групп макрозообентоса – достаточно иметь плотности поселения разноногих раков (как таксономической группы в целом) и оппортунистических видов многощетинковых червей, что не предполагает определения всех видов этих животных. В зал. Петра Великого оппортунистические виды полихет, как по отношению к эвтрофикации (оппортунисты I и II порядков), так и химическому загрязнению донных отложений (толерантные и экстремально толерантные виды), хорошо известны [10–12], что также должно ускорять процедуру и снижать затраты на получение итоговых результатов, необходимых для оценки качества морской среды.

Калибровка индекса *ВОРА*. При вычислении *ВОРА* использованы плотности поселения экстремально толерантных по отношению к загрязнению видов: *Aphelochaeta pacifica*, *Cheilonereis cyclurus* (+*Cheilonereis* sp.), *Chaetozone setosa*, *Notomastus latericeus*, Polynoidae gen. sp., *Paradialychone cincta*, *Prionospio malmgreni*, *Pseudopotamilla* sp. и *Schistomeringos japonica*. Доля дисперсии индекса *ВОРА*, объясненной вариациями предикторов TPF_{chem} , TPF_{bio} , $AMBI$ и $M-AMBI$ при аппроксимации логистической функцией, составляет соответственно 46,4; 64,9; 77,9 и 59,7 % (рис. 16). Эти результаты следует признать вполне успешными,

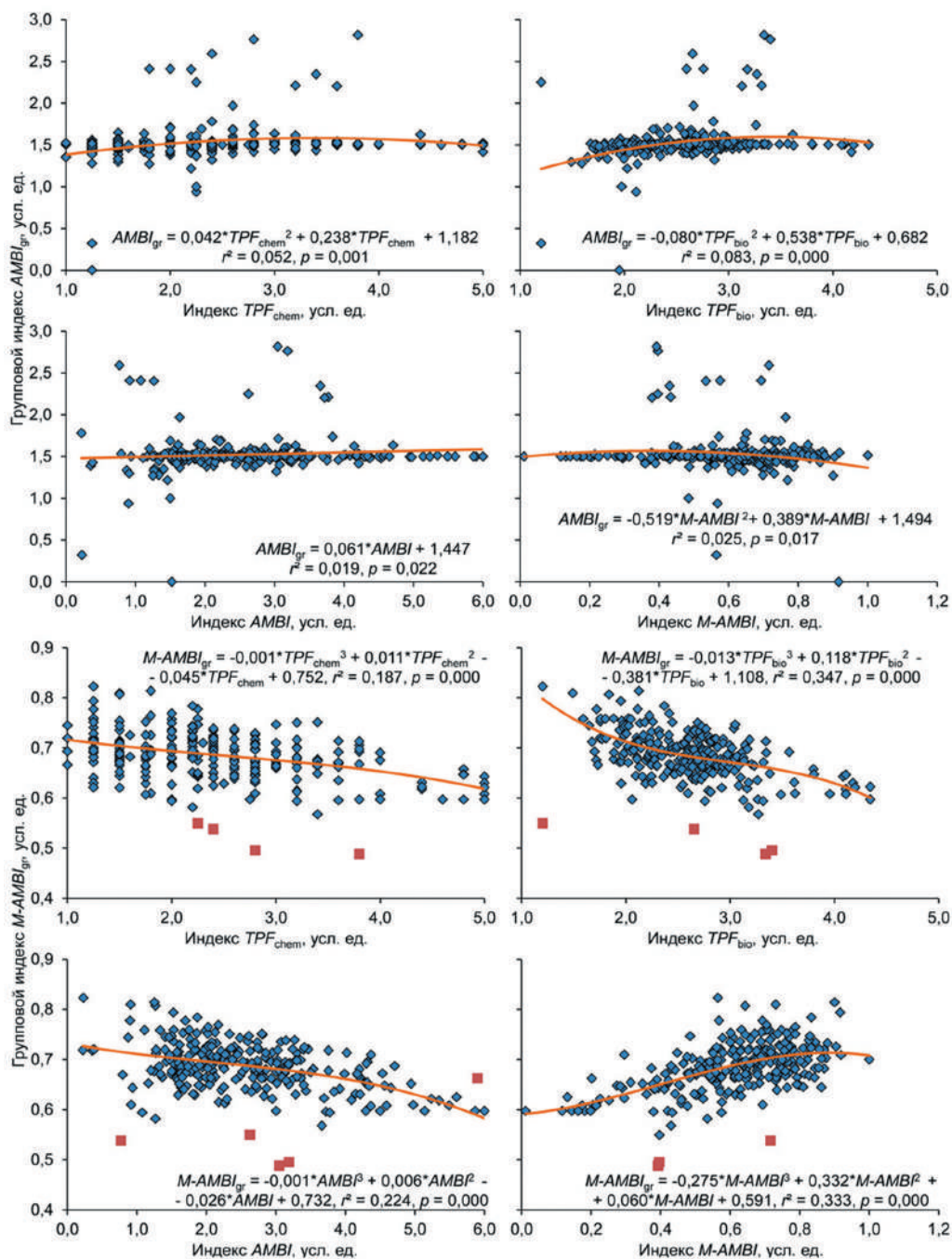


Рис. 15. Результаты калибровки групповых индексов $AMBI_{gr}$ и $M-AMBI_{gr}$: r – коэффициент корреляции, p – вероятность справедливости H_0 ; квадраты – выбросы

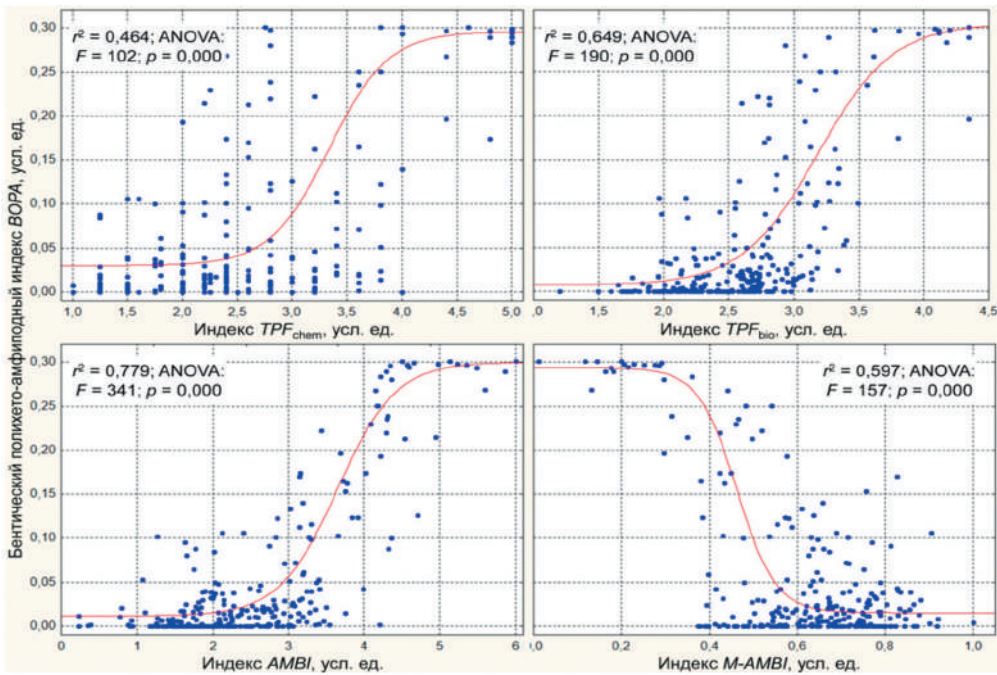


Рис. 16. Зависимости индекса $BORA$ от TPF_{chem} и наиболее эффективных биотических показателей: r – коэффициент корреляции, F – критерий Фишера, p – вероятность справедливости H_0

особенно для $AMBI$, учитывая результаты интеркалибрации различных индексов зарубежными авторами и собственные данные для индекса TPF_{bio} (независимая переменная – TPF_{chem} , 74,2–75,3 %). Поэтому индекс $BORA$ пригоден для мониторинга и биоиндикации, и, следовательно, использование таксономических групп таким способом вполне возможно. Однако для этого необходимо рассмотреть индикационную эффективность $BORA$ в сравнении с другими биотическими показателями.

Эффективность индекса $BORA$ при оценке уровня загрязнения и эвтрофикации. Очевидно, что для биоиндикации наилучшим показателем следует считать тот, который имеет наибольший и существенный (>50 %) вклад индицируемого фактора в общую объясняемую дисперсию (TEV) на фоне минимального «шума», создаваемого остальными предикторами или сторонними факторами. Как было показано ранее [7], единственным параметром, полностью удовлетворяющим этим требованиям, является TPF_{bio} (вклад ковариаты в TEV – почти 73 %, остальных факторов – в сумме <5 % или примерно 94 и 6 % от TEV , рис. 17).

В какой-то мере, этот показатель может рассматриваться и как индикатор уровня эвтрофикации (содержания $C_{орг}$), хотя и в меньшей степени. Заметный, но все же не исключительный, вклад ковариаты $C_{орг}$ в его дисперсию (45,7 % – 80,5 % от TEV) ощутимо отягощен статистически значимыми воздействиями факторов «тип грунта» и «глубина» (в сумме 11,0 % или 19,3 % от TEV).

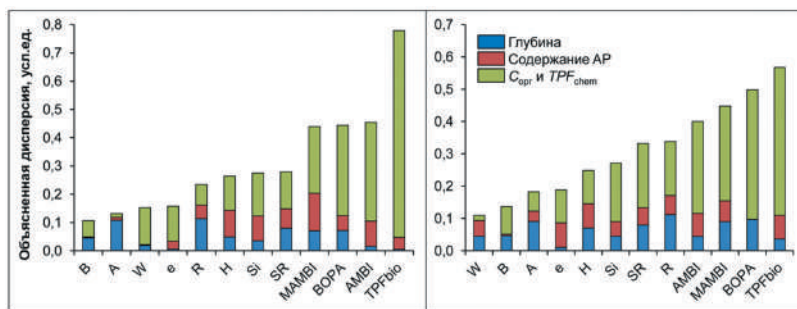


Рис. 17. Вклад различных факторов среды в общую объясненную дисперсию биотических параметров для ковариат TPF_{chem} и $C_{орг}$ (слева и справа, соответственно) по [7]

Интегральные биотические индексы $AMBI$ и $M-AMBI$ в меньшей степени соответствуют указанным требованиям, существенно уступая TPF_{bio} в TEV , тогда как вклады сторонних факторов в их изменчивость гораздо выше, что особенно заметно для ковариаты содержание $C_{орг}$. Доля дисперсии, объясненной непрерывными переменными, у этих показателей составляет всего 34,9 и 23,5 % при ковариате TPF_{chem} (меньше чем у TPF_{bio} в 2,1 и 3,1 раза, в процентах от TEV – 76,9 и 53,6) и 28,4 и 29,2 % для содержания $C_{орг}$ (в 1,6 раза, 71,0 и 65,4 %). При этом суммарные эффекты сторонних факторов достигают у $AMBI$ 23,1 и 29,0 % от TEV (ковариаты TPF_{chem} и содержание $C_{орг}$ соответственно), а у $M-AMBI$ – еще больше – 46,4 и 34,6 %.

В этом контексте индекс $BOPA$ в большей степени сопоставим с $AMBI$ и $M-AMBI$, чем с TPF_{bio} : на ковариату TPF_{chem} у него приходится 31,9 %, а на $C_{орг}$ – 40,1 % (в 2,3 и 1,1 раза, 76,6 % и 80,4 %, 23,4 % и 19,6 %). Следует подчеркнуть, что в индикативных способностях содержания $C_{орг}$ $BOPA$ явно превосходит $AMBI$ и $M-AMBI$, сближаясь в этом отношении с TPF_{bio} , и таким образом, этот показатель весьма перспективен для мониторинга и биоиндикации качества морской среды, но его адаптация к акватории зал. Петра Великого требует дополнительных исследований. Во-первых, известны, как минимум, три способа его вычисления, и во-вторых, не совсем ясно, какие виды полихет должны быть использованы при его определении (например, одни лишь экстремально толерантные или же все оппортунистические представители этой группы).

Групповые индексы видового богатства Маргалефа, разнообразия Шеннона-Винера и усредненные внутригрупповые координаты точек оптимумов

В зал. Петра Великого наиболее представительными таксономическими группами макрозообентоса являются двустворчатые и брюхоногие моллюски, разноногие и десятиногие раки, а также многощетинковые черви (табл. 3).

Точки оптимумов встречаемости первых четырех групп расположены гораздо левее, чем у полихет, а кривые распределения их F_q имеют выраженную левостороннюю асимметрию, что указывает на заметную чувствительность этих

Таблица 3. Исследованные группы макрозообентоса и координаты оптимумов их встречаемости (в ед. TPF_{chem})

Группа	Число видов	Число видов, %	Встречаемость, %	Координата оптимума
Isopoda (ES)	7	1,3	8,3	1,000
Mysida (ES)	3	0,6	3,6	1,000
Asteroidea (ES)	5	0,9	17,0	1,000
Ophiuroidea (T)	6	1,1	54,9	1,000
Echinoidea (ES)	5	0,9	10,8	1,344
Nemertea (MT)	12	2,3	62,1	1,502
Solenogastres (ES)	1	0,2	5,1	1,514
Holothuroidea (ES)	4	0,8	5,1	1,611
Echiurida (ES)	2	0,4	2,2	1,868
Decapoda (MT)	33	6,3	31,8	1,967
Sipuncula (MT)	3	0,6	10,8	2,060
Gastropoda (MT)	54	10,2	60,6	2,112
Bivalvia (MT)	93	17,6	86,6	2,197
Actiniaria (MT)	6	1,1	14,8	2,293
Hydrozoa (MT)	1	0,2	2,5	2,300
Amphipoda (MT)	83	15,7	46,6	2,326
Cumacea (MT)	10	1,9	28,5	2,361
Ascidia (MT)	4	0,8	6,9	2,591
Cirripedia (T)	2	0,4	4,3	2,717
Priapulida (T)	1	0,2	9,7	3,322
Phoronida (T)	1	0,2	14,8	3,532
Polychaeta (T)	191	36,2	98,6	5,000

Примечание: жирным шрифтом выделены наиболее представительные таксономические группы.

животных к уровню загрязнения (см. рис. 4–6). В то же время, это далеко не самые чувствительные к контаминации организмы: левее их оптимумов располагаются таковые изопод, мизид, морских звезд, ежей, офиур, голотурий и т. д. Встречаемость многощетинковых червей практически постоянна на всем диапазоне TPF_{chem} , и, следовательно, эта группа не имеет какой-либо индикаторной ценности.

Модели, полученные на основе всех данных и результатов наблюдений, усредненных для координат TPF_{chem} (шаг – предел вычисления $TPF_{chem} - 0,2$ усл. ед.), по форме почти идентичны (рис. 18). Причем, в большинстве случаев, различия вычисленных при помощи этих моделей значений индексов R и H , кроме полихет, статистически незначимы (результаты теста Вилкоксона: вероятность справедливости $H_0 p = 0,085-0,821$ и $0,010-0,017$, табл. 4), хотя визуальные отличия в форме кривых отсутствуют даже у многощетинковых червей.

Далее определение координат точек ERL_q , ERM_q и ERD_q производили по усредненным функциям, причем этот выбор является чисто волевым решением, поскольку модели, полученные на основе разных данных, оказались равноценны. Координата ERL_q в единицах TPF_{chem} у изученных групп изменялась от 2,0 до 3,8

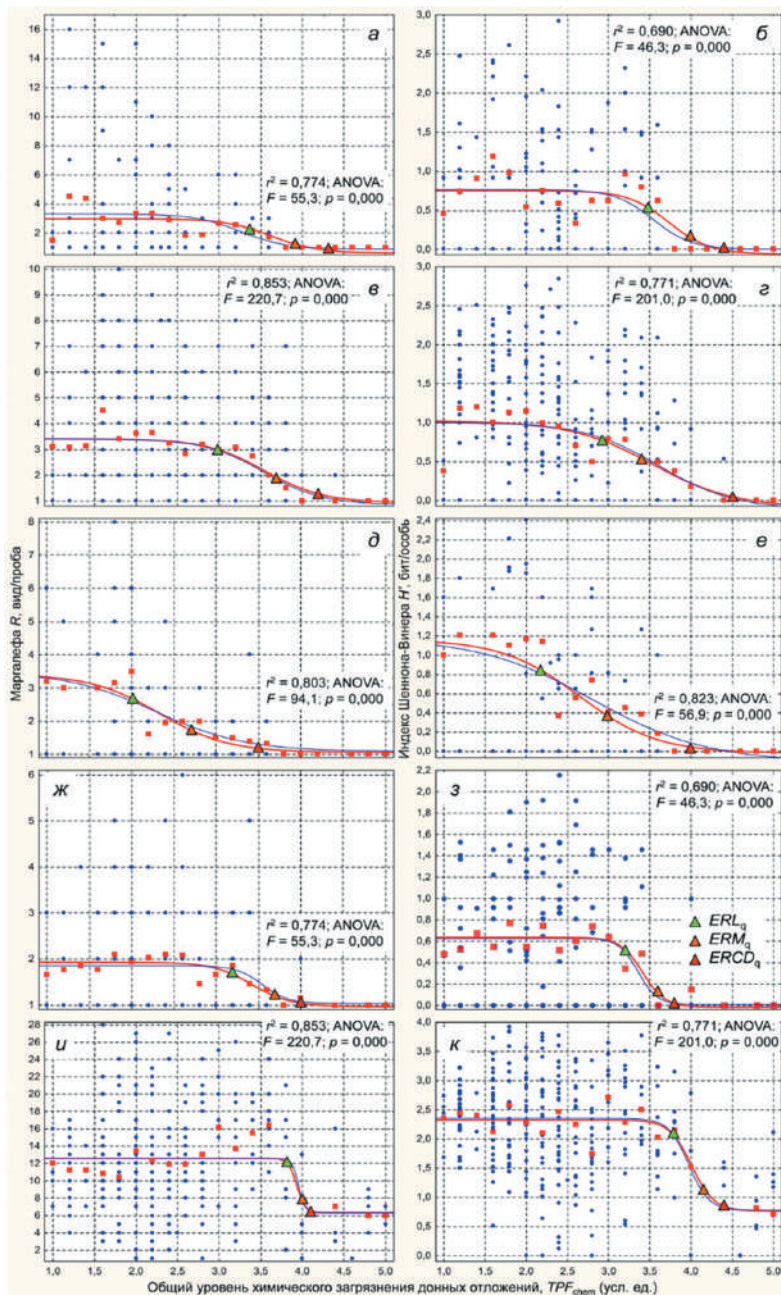


Рис. 18. Изменение R и H' вдоль градиента TPF_{chem} : а, б – Amphipoda, в, г – Bivalvia, д, е – Decapoda, ж, з – Gastropoda, и, к – Polychaeta. Кружки и квадраты – соответственно первичные и усредненные величины индексов; синяя и красная кривые – модели, полученные для всех и усреднённых данных; зеленый; оранжевый и красный треугольники – ERL_q , ERM_q и ERD_q ; r – коэффициент корреляции, F – расчётная величина критерия Фишера, p = вероятность справедливости H_0

Таблица 4. Результаты теста Вилкоксона: сравнение моделей индексов Маргалефа и Шеннона-Винера, вычисленных для всех и усреднённых данных

Группа, индекс	<i>T</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>
Amphipoda, <i>R</i>	69,0	1,616	0,106
Amphipoda, <i>H'</i>	105,0	0,365	0,715
Bivalvia, <i>R</i>	66,0	1,721	0,085
Bivalvia, <i>H'</i>	106,0	0,330	0,741
Decapoda, <i>R</i>	64,0	1,790	0,073
Decapoda, <i>H'</i>	103,0	0,434	0,664
Gastropoda, <i>R</i>	109,0	0,226	0,821
Gastropoda, <i>H'</i>	94,0	0,747	0,455
Polychaeta, <i>R</i>	41,0	2,589	0,010
Polychaeta, <i>H'</i>	47,0	2,381	0,017

Примечание. *T* и *Z* – расчетная и аппроксимированная величина критерия Вилкоксона, *p* – вероятность справедливости H_0 ; жирным шрифтом выделены статистически значимые отличия.

соответственно у декапод и полихет, составляя в среднем $3,1 \pm 0,2$ (без полихет – $2,9 \pm 0,2$) (табл. 5). Координата ERM_q варьировала в пределах 2,7–4,2 (минимум и максимум у тех же групп), достигая в среднем $3,6 \pm 0,2$ ($3,5 \pm 0,2$), у ERD_q эти значения равнялись 3,8–4,5 и $4,1 \pm 0,1$ единиц TPF_{chem} . Падение видового богатства и разнообразия на уровнях ERL_q , ERM_q и ERD_q составляло в среднем $25,2 \pm 1,4$; $69,3 \pm 4,0$ и $93,9 \pm 0,5$ %.

У бивалвий координаты ERL_q , ERM_q и ERD_q , полученные ранее и в настоящей работе, имеют сходные значения, отличаясь в максимуме лишь на величину предела

Таблица 5. Результаты определения наиболее важных характеристик моделей изменения индексов Маргалефа и Шеннона-Винера вдоль градиента TPF_{chem}

Группа, индекс	Координата TPF_{chem} , усл. ед.			Снижение функции, %		
	ERL_q	ERM_q	ERD_q	ERL_q	ERM_q	ERD_q
Amphipoda, <i>R</i>	3,3	3,9	4,3	24,5	73,0	92,3
Amphipoda, <i>H'</i>	3,5	4,0	4,4	29,3	75,3	94,2
Bivalvia, <i>R</i>	3,0	3,7	4,2	24,9	66,7	95,8
Bivalvia, <i>H'</i>	2,9 (2,8–2,9)	3,4 (3,2)	4,5 (4,4)	22,8	45,4	91,9
Decapoda, <i>R</i>	2,0	2,7	3,5	28,3	70,3	94,6
Decapoda, <i>H'</i>	2,2	3,0	4,0	25,9	67,3	95,1
Gastropoda, <i>R</i>	3,2	3,7	4,0	28,0	76,3	92,6
Gastropoda, <i>H'</i>	3,2	3,6	3,8	17,7	80,4	94,7
Polychaeta, <i>R</i>	3,8	4,0	4,1	6,9	78,8	89,1
Polychaeta, <i>H'</i>	3,8	4,2	4,4	18,1	80,6	94,8
В среднем $\pm SE$	$3,09 \pm 0,20$	$3,62 \pm 0,16$	$4,12 \pm 0,10$	$22,7 \pm 3,3$	$71,4 \pm 3,5$	$93,5 \pm 0,7$
В среднем $\pm SE^*$	$2,91 \pm 0,20$	$3,50 \pm 0,17$	$4,09 \pm 0,13$	$25,2 \pm 1,4$	$69,3 \pm 4,0$	$93,9 \pm 0,5$

* Без Polychaeta.

Примечание. В скобках – величины, полученные ранее [8, 9], SE – ошибка репрезентативности.

определения TPF_{chem} у ERM_q (0,2 усл. ед.), что дополнительно указывает на объективность оценок эти показателей. Величины порогов ERL_q и ERM_q растут в ряду Decapoda, Bivalvia, Gastropoda, Amphipoda и Polychaeta у обоих индексов, что делает их довольно удобным инструментом для визуализации нарушений бентоса (рис. 19). Для ERD_q эта последовательность нарушается его более высокими, чем у полихет, значениями у амфипод и бивалвий (соответственно R и $H' \leq 0,2$), что связано, скорее всего, с погрешностями процедуры моделирования.

Необходимо отметить, что довольно высокие значения координат ERL_q дают дополнительное объяснение малой пригодности общих для всего донного населения индексов Маргалефа и Шеннона-Винера в практике экологического мониторинга [7]. Это связано с последовательным замещением животных, чувствительных к загрязнению, примерно тем же количеством все более и более толерантных представителей бентоса и, как следствие, низкой величиной дисперсии, объясняемой изменениями уровня загрязнения и эвтрофикации (TPF_{chem} и содержанием $C_{орг}$). При этом следует учесть, что перечисленные выше группы представляют более 86 % найденных видов и таксонов более высокого ранга макрозообентоса (454 из 527).

Наконец, еще одним способом применения таксономических групп для мониторинга состояния макрозообентоса может быть использование результатов их классификации по отношению к степени загрязнения донных отложений, а именно усредненных внутри выделенных групп координат оптимумов встречаемости, плотности и биомассы (рис. 19). Вместо оптимумов логичнее было бы использовать точки перегиба моделей, отделяющие области субоптимумов, но их определение в большинстве случаев, как было показано выше, невозможно. Изолиния координаты оптимума группы II почти совпадает с таковой ПДУ, а группы III – с ERM_q , определенной по обобщенной функции состояния сообществ донной фауны (рис. 19).

Таким образом, условия морской среды на всей прибрежной акватории Владивостока в 2016 г. были далеки от оптимального состояния для чувствительных и умеренно толерантных к загрязнению представителей макрозообентоса. Непосредственно вдоль береговой черты п-ова Муравьева-Амурского качество местобитаний было благоприятным лишь для животных, толерантных к загрязнению, а в бухтах Золотой Рог, Диомид и значительной части пр-ва Босфор Восточный – только для экстремально толерантных к загрязнению организмов. Эта довольно неприглядная картина, отраженная на рис. 19, может служить примером применения в практике экологического мониторинга пороговых величин ERL_q , ERM_q и ERD_q , а также усредненных внутригрупповых координат оптимумов, полученных в результате классификации таксономических групп по отношению к загрязнению.

Выводы

Итак, на основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) Проверка индикационной эффективности индекса TPF_{gr} , разработанного по аналогии и на основе принципов построения индекса TPF_{bio} , показывает невозможность его применения в практике биомониторинга. Это обусловлено крайне

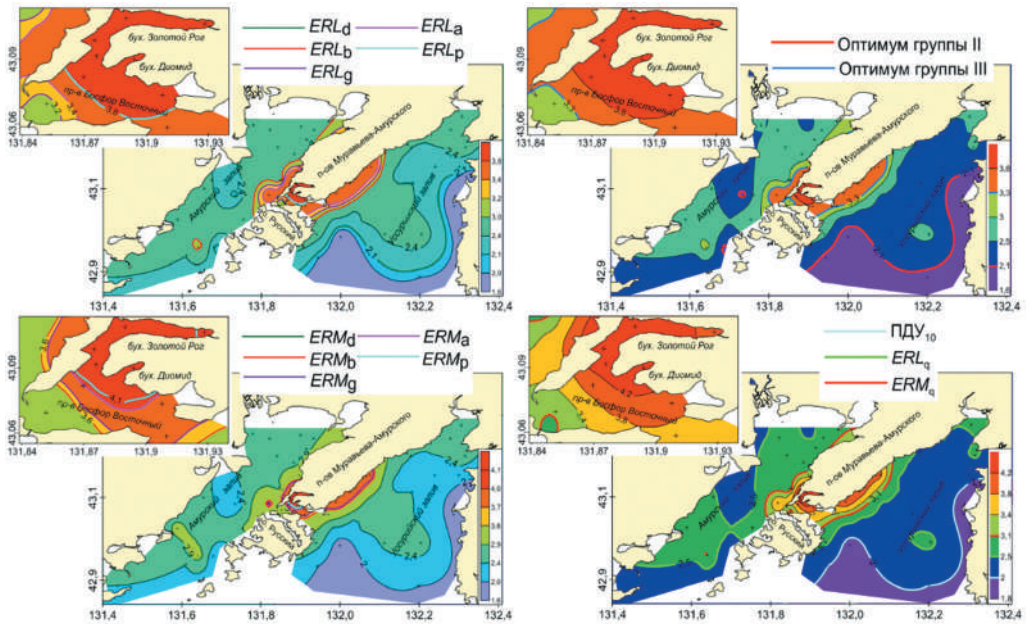


Рис. 19. Распределение усредненных для индексов Маргалефа и Шеннона-Винера значений ERL и ERM , определенных у разных таксономических групп (слева, a, b, d, g и p – амфиподы, двустворчатые моллюски, декаподы, гастроподы и полихеты), и значений групповых оптимумов, а также ПДУ, ERL_q и ERM_q (внизу справа, по [15]) у Владивостока в 2016 г.

низкой дисперсией, объясняемой вариациями предиктора (TPF_{chem}^{gr}), которая даже после процедуры снижения индивидуальной изменчивости за счет классификации таксономических групп по отношению к TPF_{chem}^{gr} , составила 44,3 %, 4,8 %, 3,0 % и 13,2 % для величин индекса TPF_{gr}^{chem} , вычисленных соответственно по оптимумам встречаемости, плотности, биомассы и его усредненным значениям.

2) Применение индексов $AMBI_{gr}$ и $M-AMBI_{gr}$, вычисляемых по плотности поселения таксономических групп и на основе их классификации по отношению к TPF_{chem}^{gr} , как и индекса TPF_{gr}^{chem} , в практике экологического мониторинга неприемлемо. Это связано с неудовлетворительными результатами их калибровки по отношению к индексам TPF_{chem}^{gr} , TPF_{bio}^{gr} , $AMBI$ и $M-AMBI$: доля объясненной перечисленными предикторами дисперсии составила для $AMBI_{gr}$ соответственно 5,2 %, 8,3 %, 1,9 % и 2,5 %, а для $M-AMBI_{gr}$ – 18,7 %, 34,7 %, 22,4 % и 33,3 %, что явно недостаточно, хотя довольно хорошо согласуется с данными зарубежных исследователей.

3) Калибровка биотического полихето-амфиподного показателя $BOPA$ по отношению к TPF_{chem}^{gr} , TPF_{bio}^{gr} , $AMBI$ и $M-AMBI$ показала, что при аппроксимации логистической функцией дисперсия, объясняемая вариациями указанных параметров, весьма высока и составляет соответственно 46,4 %, 64,9 %, 77,9 % и 59,7 %. Это свидетельствует о возможности применения $BOPA$ в практике экологического

мониторинга; об этом же говорит и оценка его индикационной эффективности общего уровня загрязнения и, особенно, эвтрофикации в сравнении с другими биотическими параметрами. Однако использование индекса *ВОРА* будет возможно только после дополнительных исследований с целью его адаптации для акватории зал. Петра Великого.

4) Оценка возможности использования общих характеристик таксономических групп в практике экологического мониторинга показала, что существует два приемлемых варианта их применения. Во-первых, это определение координат пороговых точек ERL_q и ERM_q , которые ограничивают область прогрессивной деградации донного населения – почти линейного падения моделей изменения индексов видового богатства Маргалефа и разнообразия Шеннона-Винера вдоль градиента TPF_{chem} , а также ERD_q – координаты точки, правее которой наступает полная деградация донного населения. Во-вторых, это использование усредненных внутригрупповых координат точек оптимумов встречаемости, плотности и биомассы агрегаций, выделенных в результате классификации таксономических групп по отношению к загрязнению.

5) При интерпретации оба этих способа дают сходные результаты, которые почти идентичны таковым, получаемым при применении ПДУ, а также ERL_q и ERM_q , определяемым на основе обобщенной функции состояния сообществ донной фауны (различия соответствующих показателей лежат в пределах вычисления $TPF_{chem} - 0,2$ усл. ед.). Кроме того, они позволяют выполнять картирование водоемов, что удобно, например, для визуального восприятия экологического состояния морских акваторий, как в целом, так и их отдельных участков.

Литература

1. Белан Т.А., Мощенко А.В., Чернова А.С. Долговременные изменения видового разнообразия таксоценов многощетинковых червей в прибрежной зоне Японского моря // Докл. рабочего совещания по изучению глобальных изменений на Дальнем Востоке. – Владивосток: Дальнаука. 2003. – С. 196–224 (TEACOM Publication; Vol. 8).
2. Боровиков В.П., Боровиков И.П. STATISTICA® – Статистический анализ и обработка данных в среде Windows®. – М.: Инф.-издат. дом «Филинь», 1998. – 608 с.
3. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 375 с.
4. Кабаков Р.И. R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 588 с.
5. Ким Дж., Клекка У.Р., Мьюлер К.У. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 312 с.
6. Матицкий С.Э., Шитиков В.К. (2014) Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. – URL: <http://r-analytics.blogspot.com> (дата обращения 16.11.2023).
7. Мощенко А.В. Изменчивость общих характеристик донного населения и их эффективность для мониторинга качества морской среды // Изв. ТИПРО. – 2023. – Т. 203, вып. 4. – С. 925–943. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-925-943. EDN: MNRKIR.
8. Мощенко А.В., Белан Т.А. Количественная оценка степени антропогенного нарушения сообществ макрозообентоса рыхлых грунтов // Биол. Моря. – 2008. – Т. 34, № 4. – С. 279–292.

9. Мощенко А.В., Белан Т.А. Глава 4. Разработка новых методов оценки экологического состояния природной среды дальневосточных морей // Динамика морских экосистем и условия формирования биологического потенциала морей России. Коллективная монография. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 276–313.

10. Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М. Метод оценки химического загрязнения донных осадков с использованием биоиндикации // Изв. ТИНРО. – 2022. – Т. 202, вып. 4. – С. 861–879. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-861-879.

11. Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М.. Распределение и классификация макрозообентоса залива Петра Великого Японского моря по отношению к загрязнению донных отложений // Изв. ТИНРО. – 2022. – Т. 202, вып. 3. – С. 623–639. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-623-639.

12. Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М., Лишавская Т.С., Севастьянов А.В. Адаптация метода оценки качества морской среды по данным биологического анализа на основе индексов АМВІ и М-АМВІ для залива Петра Великого Японского моря // Труды ДВНИГМИ. – 2021. – Вып. 156. – С. 142–181.

13. Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М., Лишавская Т.С., Севастьянов А.В. К методике выделения сообществ макрозообентоса: простой алгоритм для практики экологического мониторинга // Труды ДВНИГМИ. – 2021. – Вып. 156. – С. 111–141.

14. Мощенко А.В., Белан Т.А., Борисов Б.М., Лишавская Т.С., Севастьянов А.В. Основные тенденции временного хода концентраций приоритетных поллютантов в осадках прибрежных акваторий Владивостока (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. – 2021в. – Т. 201, Вып. 2. – С. 440–457. DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-440-457.

15. Отчет ФГБУ «ДВНИГМИ» «Разработка метода определения допустимого уровня химического загрязнения осадков на основе структурных изменений макрозообентоса». – 2023. – 81 с. URL: http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/NIR/Otchet_y/otchet_4.6.2_2023_moschenko.pdf (дата обращения 31.01.2024).

16. Отчет ФГБУ «ДВНИГМИ» «Совершенствование методических основ мониторинга состояния морской среды. Систематизированные данные по факторам среды и общим характеристикам сообществ макрозообентоса». – 2021. – 108 с.

17. Шипунов А.Б., Коробейников А.И., Балдин Е.М. Анализ данных с R (II). – URL: <https://www.inp.nsk.su/~baldin/DataAnalysis/R/R-07-datamining.pdf> (дата обращения 16.11.2023).

18. Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. – Тольятти: Кассандра, 2013. – 314 с.

19. Belan T.A., Moshchenko A.V. Polychaete taxocene variability associated with sediment pollution loading in the Peter the Great Bay (Sea of Japan) // Ocean Science Journal. – 2005. – Vol. 40, No. 1. – P. 1–10.

20. Borja A., Dauer D., Diaz R., Llanso R.J., Muxika I., Rodriguez J.G., Schaffner L. Assessing estuarine benthic quality conditions in Chesapeake Bay: A comparison of three indices // Ecological Indicators. – 2008. – Vol. 8, Iss. 4. – P. 395–403.

21. Borja A., Franco J., Muxika I. The biotic indices and the Water Framework Directive: the required consensus in the new benthic monitoring tools // Mar. Poll. Bull. – 2004. – Vol. 48. – P. 405–408.

22. Borja A., Franco J., Pérez V. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments // Marine Pollution Bulletin. – 2000. – Vol. 40. – P. 1100–1114.

23. Borja A., Josefson A.B., Miles A., Muxika I., Olsgard F., Phillips G., Rodriguez G., Rygg B. An approach to the intercalibration of benthic ecological status assessment in the North Atlantic ecoregion, according to the European Water Framework Directive // *Mar. Pollut. Bull.* – 2007. – Vol. 55. – P. 42–52.
24. Borja Á., Mader J., Muxika I. Instructions for the use of the AMBI index software (Version 5.0) // *Revista de Investigacion Marina.* – 2012. – Vol. 19, No. 3. – P. 71–82.
25. Dauvin J.-C., Bachelet G., Barille A.-L., Blanchet H., Montaudouin, de, X., Lavesque N., Ruellet T. Benthic indicators and index approaches in the three main estuaries along the French Atlantic coast (Seine, Loire and Gironde) // *Marine Ecology.* – 2009. – Vol. 30. – P. 228–240.
26. Eaton L. Development and validation of biocriteria using benthic macroinvertebrates for North Carolina estuarine waters // *Marine Pollution Bulletin.* – 2001. – Vol. 42. – P. 23–30.
27. Engle V.D., Summers J.K. Refinement, validation, and application of a benthic condition index for Northern Gulf of Mexico estuaries // *Estuaries.* – 1999. – Vol. 22. – P. 624–635.
28. Huisman J., Olf H., Fresco L.F.M. A Hierarchical Set of Models for Species Response Analysis // *Journal of Vegetation Science.* – 1993. – Vol. 4, No. 1. – P. 37–46.
29. Jansen J. Hierarchical species response curves in package eHOF – 2017. – P. 1–8. – URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/eHOF/vignettes/eHOF.pdf> (дата обращения 10.11.2023).
30. Jansen J., Oksanen J. How to model species responses along ecological gradients – Huisman–Olf–Fresco models revisited // *Journal of Vegetation Science.* – 2013. – P. 1–10.
31. Karr J.R. Assessment of biotic integrity using fish communities // *Fisheries.* – 1981. – Vol. 6. – P. 21–27.
32. Long E.R., MacDonald D.D., Smith S.L., Calde, F.D. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments // *Environ. Management.* – 1995. – Vol. 19. – P. 81–97.
33. Mann R.E. Global environmental monitoring system (GEMS). – Action Plan for Phase 1. SCOPE, rep. 3. – Toronto: 1973. – 130 p.
34. Muxika, I., Á. Borja, J. Bald. Using historical data, expert judgment and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive // *Mar. Poll. Bull.* – 2007. – Vol. 55. – P. 16–29.
35. Package ‘AID’. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/AID/AID.pdf> (дата обращения 16.11.2023).
36. Package ‘eHOF’ – 2020. – P. 1–13. – URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/eHOF/eHOF.pdf> (дата обращения 16.11.2023).
37. Paul J.F., Scott K.J., Campbell D.E., Gentile J.H., Strobel C.S., Valente R.M., Weisberg S.B., Holland A.F., Ranasinghe J.A. Developing and applying a benthic index of estuarine condition for the Virginian Biogeographic Province // *Ecological Indicators.* – 2001. – Vol. 1. – P. 83–99.
38. Ponti M., Vadrucchi M.R., Orfanidis S., Pinna M. Biotic indices for ecological status of transitional water ecosystems // *Transit. Waters Bull.* – 2009. – Vol. 3, No. 3. – P. 32–90.
39. Simboura N., Reizopoulou S. An intercalibration of classification metrics of benthic macroinvertebrates in coastal and transitional ecosystems of the Eastern Mediterranean ecoregion (Greece) // *Mar. Pollut. Bull.* – 2008. – Vol. 56. – P. 116–126.
40. Statistical analysis and interpretation of marine community data: reference methods for marine pollution studies. – Nairobi: UNEP, 1995. – № 64. – 75 p.
41. Thompson B., Lowe S. Assessment of macrobenthos response to sediment contamination in the San Francisco estuary, California, USA // *Environmental Toxicology and Chemistry.* – 2004. – Vol. 23. – P. 2178–2187.

42. Van Dolah R.F., Hyland J.L., Holland A.F., Rosen J.S., Snoots T.R. A benthic index of biological integrity for assessing habitat quality in estuaries of the southeastern USA // *Marine Environ. Research.* – 1999. – Vol. 48. – P. 269–283.

43. Van Hoey G., Borja A., Birchenough S., Buhl-Mortensen L., Degraer S., Fleischer D., Kerckhof F., Magni P., Muxika I., Reiss H., Schröder H., Zettler M.L. The use of benthic indicators in Europe: From the Water Framework Directive to the Marine Strategy Framework Directive // *Mar. Pollut. Bull.* – 2010. – Vol. 60. – P. 2187–2196.

44. Veríssimo H., Neto J.M., Teixeira H., Franco J.N., Fath B.D., Marques J.C., Patrício J. Ability of benthic indicators to assess ecological quality in estuaries following management. – URL: https://www.researchgate.net/publication/236033738_Ability_of_benthic_indicators_to_assess_ecological_quality_in_estuaries_following_management (дата обращения 20.01.2023).

45. Weisberg S.B., Ranasinghe J.A., Dauer D.M., Schoner L.C., Diaz R.J., Frithsen J.B. An estuarine benthic index of biotic integrity (B-IBI) for Chesapeake Bay // *Estuaries.* – 1997. – Vol. 20, No. – P. 149–158.

УСЛОВИЯ СРЕДЫ И СОСТОЯНИЕ МАКРОЗООБЕНТОСА НА АКВАТОРИИ МОРСКОГО ПОРТА ВЛАДИВОСТОК НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Введение

В современных условиях морские экосистемы испытывают все возрастающее антропогенное воздействие, которое вызывает неблагоприятные экологические последствия – исчезают чувствительные к загрязнению виды и развиваются в массовых количествах организмы, приспособившиеся к новым условиям. В результате происходит изменение состава и структуры сообществ, снижается разнообразие и продуктивность экосистем.

В настоящее время основное техногенное загрязнение сосредоточено в средней и нижней зоне шельфа и в приустьевых районах моря. С указанными зонами связано также интенсивное загрязнение донных осадков нефтепродуктами [6].

Приоритетными и наиболее опасными загрязнителями морей России являются: нефтяные углеводороды, хлорорганические соединения, металлы, фенолы и ряд других соединений. Загрязняющие вещества поступают в морской бассейн в составе твердого и жидкого речного стока, а также – аэрозолей. Они связаны с осадочным материалом и участвуют в морском седиментогенезе, в процессе которого происходит либо избыточная их аккумуляция, либо рассеивание, как в водной толще, так и на дне моря. Металлы и иные загрязняющие вещества из водной толщи интенсивно извлекаются в процессе биофильтрации вод планктонными и бентосными организмами [6, 13].

Одна из задач экологических экспедиций ДВНИГМИ в 2019, 2021–2022 гг. состояла в исследовании условий существования макрозообентоса морских акваторий вблизи Владивостока в современных условиях.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы получить представление об уровне антропогенной нагрузки (загрязнения) на акватории морского порта Владивосток, а также об особенностях видового состава и количественных показателей макрозообентоса на акваториях с разным уровнем загрязнения.

Материалы и методы

Исходными материалами послужили пробы макрозообентоса и донных отложений, собранные на акватории морского порта Владивосток. В августе 2019 г. работы выполняли на станциях ГСН и дополнительных станциях в бухтах Золотой Рог, Диомид и проливе Босфор Восточный (рис. 1). В сентябре 2021 и сентябре 2022 гг. пробоотбор проводили на трех станциях в проливе Босфор Восточный (ст. Z14, 19, 23).

На каждой станции отбирали по две пробы грунта дночерпателем ван-Вина (0,11 м²). Всего было отобрано 36 проб макрозообентоса. Фиксацию и обработку

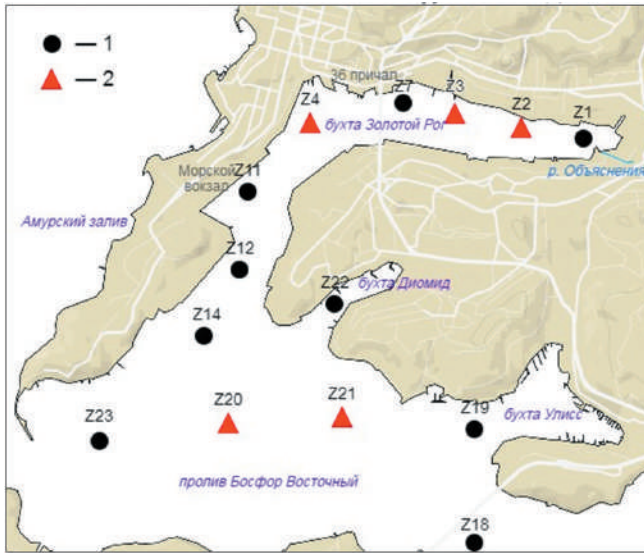


Рис. 1. Карта-схема отбора проб на морских прибрежных акваториях вблизи Владивостока
1 – станции ГСН, 2 – дополнительные станции 2019 г.

проб бентоса выполняли по стандартным методикам [14]. Доминирующими считали виды, составляющие не менее 30 % от общей биомассы и численности бентоса в пробе, субдоминантными видами – от 15 до 29 %. Для каждой пробы определяли суммарные значения биомассы и численности бентоса, число видов, индексы видового богатства Маргалефа (R) и видового разнообразия Шеннона-Винера (H). Экологические индексы подсчитывали в соответствии с Руководством (33) по формулам:

$$H = -\sum p_i \cdot \log_2 p_i, \quad (1)$$

$$R = \frac{S-1}{\log_2 N}, \quad (2)$$

где p_i – доля вида i от общей численности; S – общее число видов в пробе, N – общее число особей в пробе.

Для анализа содержания в грунтах металлов (МЕ), фенолов, общего содержания нефтяных углеводородов (ОСНУ) и хлорорганических пестицидов (Σ ДДТ) использовали материалы базы данных, структурированной в Региональном центре океанологических данных по дальневосточному региону ФГБУ «ДВНИГМИ». Все химические анализы выполнялись сотрудниками Приморского УГМС с применением стандартных методик Росгидромета [8].

Для классификации станций на основе данных о концентрации загрязняющих веществ использовали метод анализа главных компонент (РСА). Предварительная обработка включала агрегирование данных по станциям и годам, логарифмическую трансформацию и нормализацию. Анализ проводился с использованием двух главных компонент. Результаты были представлены в двумерном пространстве

с последующим применением алгоритма k-means для кластеризации ($k = 4$). Анализ осуществлялся с применением языка программирования Python и специализированных библиотек статистического анализа.

Разграничения донных сообществ осуществляли методом иерархического агломеративного кластерного анализа (33). Кластеры с уровнем сходства около 30 % относили к одному сообществу.

Результаты и обсуждение

Общая характеристика района исследования

Порт Владивосток – один из основных транспортных узлов российского Дальнего Востока, крупнейший тихоокеанский порт России, играющий важную роль в международных перевозках в Азиатско-Тихоокеанском регионе и внутрироссийских каботажных перевозках. Расположен на акваториях бухт Золотой Рог, Диомид и пролива Босфор Восточный.

Берега акватории практически на всем протяжении обустроены 66 причальными сооружениями, заняты под стоянку судов. На берегах расположены многочисленные судостроительные и судоремонтные предприятия, стоянки судов торгового, рыболовного и военно-морского флота, морские вокзалы и грузовые терминалы. Берега искусственно выровнены и местами расширены для портовых сооружений. Диапазон глубин варьирует в пределах 8–27 м в бухте Золотой Рог, 22–26 м – в бухте Диомид, 26–50 м – в проливе Босфор Восточный.

Распределение температуры и солёности вод акватории отличается высокой пространственно-временной изменчивостью, что обусловлено в основном антропогенным влиянием (загрязненный ливневой сток, сбросы подогретых вод из системы охлаждения ВТЭЦ-2). Небольшие вертикальные градиенты температуры и солёности, особенно в подповерхностном слое, возникают вследствие интенсивного перемешивания при воздействии ветра и движения судов. Минимальное значение температуры воды $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ за период с апреля по ноябрь, начиная с 1998 г., зарегистрировано в 2010 г. на выходе из бухты. В январе-феврале температура может опускаться до $-1,84\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]. Максимальная температура за этот же период ($+34,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) зафиксирована в августе 2022 г. на поверхности в кутовой, мелководной части акватории.

Изменение солёности в толще вод происходит под воздействием испарения с поверхности, осадков, притока солёной воды из смежных акваторий, поступления от береговых стоков и вод р. Объяснения. Основываясь на результатах наблюдений за период 2000–2023 гг., самая низкая солёность (15,77 ‰) была зарегистрирована в августе 2019 г. на поверхности на выходе из бухты Золотой Рог (ст. Z12). Максимальная (34,72 ‰) – в мае 2016 г. на горизонте 10 м (ст. Z11). Средняя солёность по всей толще составляет 31,84 ‰, у дна – 32,53 ‰. Как отмечали авторы [7], солёность на поверхности бухты в течение последних десятилетий имеет тенденцию к понижению.

На протяжении многих десятилетий наиболее неблагоприятные гидрохимические условия наблюдаются в бухте Золотой Рог. Об этом свидетельствует

пониженное содержание кислорода (и процент его насыщения), сопровождаемое превышением ПДК по биохимическому потреблению кислорода, высокая концентрация биогенных элементов и, прежде всего, нитритного и аммонийного азота, а также фосфатов [9, 10]. В отдельные годы в придонном слое мелководной кутовой части бухты Золотой Рог периодически отмечается практически полное отсутствие растворенного кислорода (1–5 % насыщения) и сероводородное загрязнение осадков, что связывают исключительно с антропогенным воздействием. В проливе Босфор Восточный также выявлены случаи низкого и экстремально низкого содержания кислорода (19–31 % насыщения). Причина – отсутствие вертикального перемешивания из-за ярко-выраженного сезонного термоклина [15], а также адвекция гипоксийных придонных вод [17].

Наблюдения свидетельствуют, что в прибрежной зоне Японского моря наиболее загрязненной в течение многих десятилетий остается бухта Золотой Рог [4, 32]. Большая часть неочищенных сточных вод г. Владивостока сбрасывается в бухту – 3597,44 тыс. м³/год [5]. Ливневой сток приносит в акваторию чрезвычайно загрязненные воды с автомобильных и железнодорожных путей, а основной вклад в загрязнение вносит р. Объяснения, являющаяся приемником сточных вод ВТЭЦ-2 и канализационных стоков жилых микрорайонов [5].

Донные отложения внутренней акватории бухты Золотой Рог представлены жидкими и полужидкими черными илами, пропитанными нефтепродуктами, содержащими различные антропогенные включения. По данным авторов [18], толщина антропогенного слоя осадков в срединной части бухты составляет около двух метров. На выходе из бухты преобладают сильно заиленные гравелистые осадки. В проливе Босфор Восточный встречаются илистые грунты, часто с заметной примесью гравия, песка, ракуши и шлака.

Содержание органического углерода в донных отложениях рассматриваемого района по данным исследований 2019 г. достигает значительных величин и изменяется от 30,13 мг/г в средней части пролива Босфор Восточный до 99,52 мг/г в осадках кутовой части бухты Золотой Рог, что свидетельствует об очень высоком органическом загрязнении отложений. Факт высокого уровня эвтрофирования бухты подтверждают, в том числе, результаты десятилетних наблюдений за составом и количеством фитопланктона, которые выявили преобладание видов диатомовых и эвгленовых водорослей, известных как показатели эвтрофных вод или их органического загрязнения [16].

Для получения представления об уровне загрязнения рассматриваемых акваторий морского порта в табл. 1 приведены концентрации отдельных загрязняющих веществ (ЗВ) в донных отложениях в 2019, 2021–2022 гг. На рис. 2 показаны результаты анализа содержания ЗВ в осадках методом анализа главных компонент: ОСНУ, Σ ДДТ, МЕ – Cu, Co, Cd, Pb, Ni, Zn, Fe, Mn, Hg, Cr, фенолов. Результаты показывают, что рассматриваемые районы различаются не только по уровню, но и по характеру загрязнения.

Группы станций I и II (рис. 2) представляют акваторию пролива Босфор Восточный с умеренным и высоким уровнями нагрузки, где загрязнение

Таблица 1. Среднее содержание отдельных загрязняющих веществ в донных осадках акваторий морского порта Владивосток в 2019 и в 2021–2022 гг.

Показатель/ Акватория	Бухта Золотой Рог ст. Z1–12	Бухта Диомид ст. Z22	Пролив Босфор Восточный ст. Z14,18,19,23
2019 г.			
ОСНУ, мг/г	15,6 ± 2,7	8,4 ± 0,8	3,1 ± 0,6
ΣДДТ	155,2 ± 48,0	44,1 ± 0,5	11,7 ± 1,2
Pb, мкг/г	341,2 ± 126,4	244,4 ± 7,9	65,0 ± 9,6
Cu, мкг/г	220,7 ± 42,5	735,2 ± 293,2	40,7 ± 3,7
Zn, мкг/г	461,2 ± 75,0	1170,4 ± 485,6	139,4 ± 14,3
2021 г.			
ОСНУ, мг/г	11,8 ± 2,7	4,6 ± 2,3	1,3 ± 0,4
ΣДДТ	21,8 ± 3,5	20,2 ± 8,0	7,5 ± 5,1
Pb, мкг/г	149,1 ± 24,0	249,4 ± 33,7	61,3 ± 10,9
Cu, мкг/г	124,4 ± 22,6	446,4 ± 11,2	36,0 ± 4,7
Zn, мкг/г	312,9 ± 57,4	335,0 ± 314,6	87,2 ± 9,8
2022 г.			
ОСНУ, мг/г	10,8 ± 2,9	3,7 ± 0,1	0,9 ± 0,3
ΣДДТ	32,4 ± 4,8	27,4 ± 5,1	14,3 ± 3,6
Pb, мкг/г	147,9 ± 22,0	214,4 ± 1,0	54,2 ± 3,6
Cu, мкг/г	130,5 ± 25,2	511,0 ± 29,0	34,0 ± 3,1
Zn, мкг/г	303,8 ± 56,2	776,2 ± 202,0	99,5 ± 9,4

Примечание. Приведены средние значения ± стандартная ошибка, серой заливкой выделены средние значения ЗВ, превышающие верхнюю границу максимальных пороговых значений, курсивом – минимальных. Величины пороговых концентраций для ОСНУ, содержание МЕ и ΣДДТ даны по [11, 13, 20, 26].

обусловлено, главным образом, нефтяными углеводородами и пестицидами (ΣДДТ), тогда как концентрации МЕ невелики.

Между собой эти группы отличаются по величинам ОСНУ и содержания МЕ, более высокие значения которых отмечаются в группе II. При этом содержание почти всех ЗВ в большинстве случаев находятся на уровне верхней границы минимальных пороговых значений или превышают ее. При таком уровне загрязнения в донных сообществах и организмах бентоса наблюдаются обратимые негативные изменения [26].

К самым загрязненным относятся станции группы IV – акватории бухты Диомид (ст. Z-22) и внутренней части бухты Золотой Рог (ст. Z-1, 3, 7). Здесь отмечаются максимальные значения ОСНУ, ΣДДТ и ряда МЕ – Cu, Pb, Zn, Mn, Hg.

Группа III включает большую часть станций бухты Золотой Рог, расположенных на выходе (ст. Z-11, 12), и две станции в кутовой части бухты (ст. Z-1, 4). Для этой группы станций характерно наиболее высокое фенольное загрязнение осадков, тогда как ОСНУ, концентрации ΣДДТ и МЕ ниже, чем в группе IV. Однако

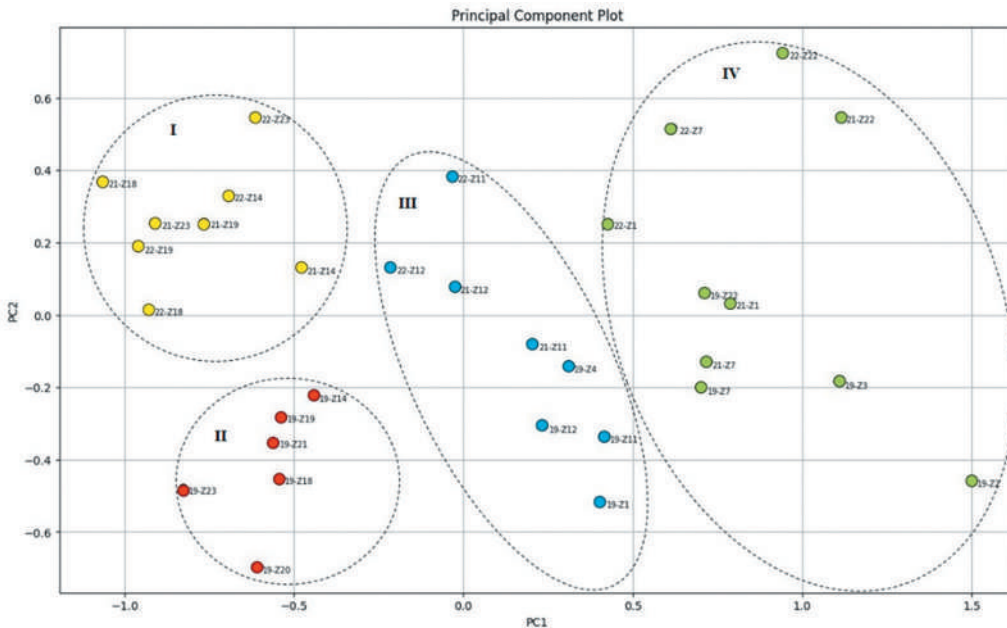


Рис. 2. Акватория морского порта. Ординация антропогенных факторов среды методом анализа главных компонент: I, II – умеренный уровень содержания МЕ, умеренный и высокий уровни содержания ОСНУ и Σ ДДТ; III, IV – экстремально высокий и высокий уровни содержания ОСНУ, Σ ДДТ и МЕ, высокий уровень концентраций фенолов

в обеих группах станций содержание ЗВ в донных осадках характерно для высоко загрязненных индустриальных прибрежных районов и во много раз превышает фоновые уровни [32]. При этом значения ОСНУ, содержание МЕ и Σ ДДТ в бухтах Золотой Рог и Диомид часто превышают верхнюю границу максимальных пороговых концентраций (табл. 1).

Таким образом, исходя из величин содержания рассматриваемых ЗВ в донных отложениях, можно констатировать, что наиболее загрязненными акваториями морского порта являются бухты Золотой Рог и Диомид. Это районы экстремально высокого загрязнения, при котором происходят необратимые изменения в организмах бентоса и их сообществах – редукция видового богатства и уменьшение обилия бентоса [26]. Необходимо отметить, что одни только вышеперечисленные токсиканты, рассматриваемые здесь и присутствовавшие в донных осадках этих бухт, способны вызывать массовую гибель животных. Однако это далеко не полный перечень всех ЗВ, поступающих в воды и отложения, а совокупное их воздействие на донные организмы, безусловно, превосходит токсичное влияние отдельно рассматриваемых поллютантов.

Рассматриваемые участки пролива Босфор Восточный подвержены влиянию загрязнения в меньшей степени, чем бухты Диомид и Золотой Рог, однако концентрации отдельных ЗВ – ОСНУ, Σ ДДТ и отдельных металлов, таких как ртуть, – представляют угрозу для донного населения.

Состав, структура и распределение донной фауны

Бухта Золотой Рог. В составе макрозообентоса на семи станциях (ст. Z1-Z12) идентифицировано 36 видов животных, большая часть которых (20 видов) представлена многощетинковыми червями. Встречено девять видов двустворчатых моллюсков, два вида ракообразных, а также по одному виду декапод, форонид, немертин, брюхоногих моллюсков и иглокожих – ювенильных особей морской звезды *Asterias amurensis*. На ст. Z1 в кутовой части бухты живых организмов бентоса не обнаружено. Также не найдено животных в одной из проб на ст. Z2. Число видов менялось от восьми во внутренней части бухты (ст. Z2-Z3) до 18–21 вида на выходе (ст. Z11-Z12). В средней части на ст. Z4 и Z7 найдено по 13 видов.

Общие величины биомассы и численности бентоса в среднем составили $49,3 \pm 11,6$ г/м² и $4846,8 \pm 2397,4$ экз./м², основу которых создавали многощетинковые черви – *Aphelochaeta pacifica*, *Chaetozone setosa*, *Schistomeringos japonica*, *Notomastus latericeus*, *Dipolydora cardalia*, *Paradialychone cincta*, а также представители форонид.

Бухта Диомид. В двух пробах на станции обнаружено 11 видов. Семь из них представлены полихетами, три – двустворчатыми моллюсками и один – немертиной. По биомассе и численно доминировали: полихета *N. latericeus* и двустворчатый моллюск *Theora lubrica*. Значения биомассы и численности составили $7,7 \pm 9,3$ г/м² и $150,6 \pm 174,6$ экз./м².

Пролив Босфор Восточный, включая станцию Z19 на выходе из бухты Улсс. На станциях акватории в период 2019, 2021–2022 гг. обнаружено 110 видов донных беспозвоночных, из которых 57 видов представлены многощетинковыми червями. В группе двустворчатых моллюсков идентифицировано 22 вида; в группе брюхоногих – восемь. Остальные группы включали от одного до пяти видов. Значения биомассы и численности составили $526,1 \pm 87,2$ г/м² и $2121,8 \pm 382,0$ экз./м². Основной вклад в биомассу привнесены двустворчатыми моллюсками – 79,3 % (*Macoma scarlatoi*, *M. nipponica*, *Protocallithaca adamsi*, *Mya truncata*, *Ennucula tenuis*, *Mytilus trossulus*, *Mizuhopecten yessoensis*), тогда как численность была сформирована полихетами – 71,7 % (*A. pacifica*, *Scoloplos armiger*, *Scoletoma longifolia*, *Sch. japonica*, *Ampharete sibirica*). Заметный вклад в общую численность (19,4 %) привнесены офиурами (*Ophiura sarsii*, *O. sarsii vadicola*).

Список видов макрозообентоса акватории морского порта Владивосток по данным 2019, 2021–2022 гг. приведен в Приложении.

Распределение донных сообществ

Таксономический и видовой состав, а также видовое обилие бентоса рассматриваемых акваторий залива отражают различный уровень антропогенной нагрузки. На основе кластер-анализа проб бентоса выделены два донных сообщества (рис. 3, табл. 2–3), при этом станция 19-Z1, расположенная в кутовой части бухты Золотой Рог, обособляется от всех остальных (рис. 3). Живых организмов бентоса на этой станции в 2019 г. не обнаружено.

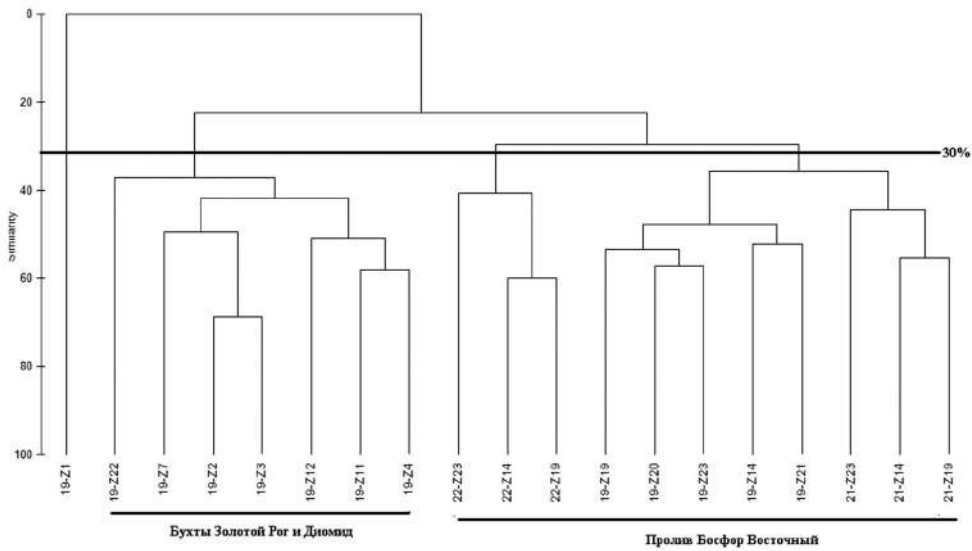


Рис. 3. Дендрограмма видового подобия бентоса между станциями в 2019, 2021–2022 гг.

Первое сообщество объединяет бентос на станциях бухт Золотой Рог и Диомид, исследованный в 2019 г. Станции отнесены к группам III и IV с экстремально высоким и высоким уровнями загрязнения донных отложений нефтяными углеводородами, пестицидами и металлами (рис. 2). Данная группировка бентоса отличается низкой общей биомассой ($54,1 \pm 10,3$ г/м²) и высокой плотностью поселения за счет преобладания мелких животных ($5193,0 \pm 2391,3$ экз./м²). Основа биомассы и численности создается полихетами – 80,7 и 96,3 % соответственно. В сообществе идентифицировано 38 видов беспозвоночных (8 групп).

Таблица 2. Структурообразующие виды макрозообентоса (P% ≥ 30 %) и их количественные показатели в сообществе бухт Золотой Рог и Диомид

Группа	Вид	P%	B _{cp.}	B _{SE}	A _{cp.}	A _{SE}
Polychaeta	<i>Aphelochaeta pacifica</i>	100,0	18,29	4,64	2 114,36	556,50
Polychaeta	<i>Schistomeringos japonica</i>	92,9	5,48	2,50	531,00	224,95
Polychaeta	<i>Cheilonereis cyclurus</i>	78,6	3,24	0,99	47,57	13,57
Polychaeta	<i>Notomastus latericeus</i>	57,1	4,84	3,00	140,14	63,95
Polychaeta	<i>Paradialychone cincta</i>	57,1	2,26	1,92	1969,71	1930,48
Asteroidea	<i>Asterias amurensis</i>	57,1	0,13	0,04	10,93	3,95
Polychaeta	<i>Chaetozone setosa</i>	42,9	8,07	6,30	121,50	77,05
Bivalvia	<i>Theora lubrica</i>	42,9	3,91	2,60	82,29	52,19
Polychaeta	<i>Glycera capitata</i>	42,9	0,32	0,17	16,71	7,62
Polychaeta	<i>Capitella capitata</i>	35,7	0,06	0,04	7,07	3,59

Примечание. P% – коэффициент встречаемости, B_{cp.} – средняя биомасса (г/м²), A_{cp.} – средняя численность (экз./м²), SE – стандартная ошибка. Жирным шрифтом выделены доминирующие и субдоминантные виды.

Таблица 3. Структурообразующие виды макрозообентоса (P% ≥ 30 %) и их количественные показатели в сообществе пролива Босфор Восточный

Группа	Вид	P%	B _{ср.}	B _{SE}	A _{ср.}	A _{SE}
Polychaeta	<i>Scoloplos armiger</i>	100,0	3,53	0,82	114,65	19,28
Polychaeta	<i>Schistomeringos japonica</i>	90,0	1,15	0,26	133,05	35,42
Polychaeta	<i>Aphelochaeta pacifica</i>	85,0	3,75	1,33	447,05	202,17
Polychaeta	<i>Notomastus latericeus</i>	85,0	1,01	0,29	38,15	9,63
Polychaeta	<i>Scoletoma longifolia</i>	80,0	0,99	0,37	110,20	31,73
Polychaeta	<i>Scalibregma inflatum</i>	60,0	9,94	3,75	19,50	6,37
Nemertea	Nemertea Indet.	60,0	3,58	1,62	12,05	3,38
Polychaeta	<i>Dipolydora cardalia</i>	55,0	1,59	1,11	63,15	39,74
Ophiuroidea	<i>Ophiura sarsii</i>	50,0	7,65	3,26	57,60	20,18
Polychaeta	<i>Pherusa plumosa</i>	50,0	4,71	1,79	16,90	5,83
Ophiuroidea	<i>Ophiura sarsii vadicola</i>	45,0	26,22	10,66	336,00	135,09
Bivalvia	<i>Ennucula tenuis</i>	45,0	2,08	0,79	36,20	12,98
Polychaeta	<i>Glycera capitata</i>	45,0	0,25	0,10	11,80	4,21
Polychaeta	<i>Sigambra bassi</i>	45,0	0,12	0,04	11,00	3,24
Polychaeta	<i>Chaetozone setosa</i>	40,0	4,65	2,97	210,35	168,37
Polychaeta	<i>Glycinde armigera</i>	40,0	0,07	0,03	4,65	1,40
Bivalvia	<i>Macoma scarlatoi</i>	35,0	134,61	46,69	12,15	4,55
Bivalvia	<i>Axinopsida subquadrata</i>	35,0	0,14	0,06	5,65	2,28
Polychaeta	<i>Eteone</i> sp.	30,0	0,05	0,02	3,20	1,19

Примечание. P% – коэффициент встречаемости, B_{ср.} – средняя биомасса (г/м²), A_{ср.} – средняя численность (экз./м²), SE – стандартная ошибка. Жирным шрифтом выделены доминирующие и субдоминантные виды.

Наиболее высокими значениями частоты встречаемости, биомассы и плотности поселения характеризовались пять видов многочетинковых червей: *A. pacifica*, *Sch. japonica*, *Cheilonereis cyclurus*, *N. latericeus* и *P. cincta* (табл. 2). По биомассе (33,8 % от общей) и численности (41,1 %) доминировала *A. pacifica*.

Полихета *P. cincta* была вторым видом-доминантом по численности (38,0 %). Обращает на себя внимание тот факт, что большинство структурообразующих видов данного сообщества (табл. 2), включая вышеперечисленные виды, а также и полихету *Ch. setosa*, относятся к оппортунистическим, толерантным видам.

В сообществе также присутствует признанный индикатор органического загрязнения – полихета *Capitella capitata* [23, 24, 30, 31].

Вторая группировка включает бентос пролива Босфор Восточный, исследованный в 2019, 2021–2022 гг. (рис. 3). Станции этого участка дна характеризуются умеренным и высоким уровнями загрязнения – группы станций I и II (рис. 2). В сообществе идентифицировано 109 видов (13 групп). Значения общей биомассы и численности составили $526,1 \pm 87,2$ г/м² и $2121,8 \pm 382,0$ экз./м². Четко выраженных видов-доминантов в сообществе нет. Субдоминирующим видом по биомассе был двустворчатый моллюск *M. scarlatoi* (25,6 %). По численности

видами-субдоминантами выступали полихета *A. pacifica* (21,1 %) и офиура *O. sarsii vadicola* (15,8 %).

Как следует из данных, приведенных в табл. 3, в сообществе присутствуют как чувствительные к загрязнению виды – полихеты *Scoloplos armiger* (100 % встречаемость), *S. longifolia*, *Scalibregma inflatum*, *Sigambra bassi*, офиуры, двустворчатые моллюски [3, 21], так и устойчивые к загрязнениям организмы. Количественные показатели резистентных видов значительно ниже таковых, отмеченных в первом сообществе.

Таким образом, донная фауна наиболее загрязненных акваторий морского порта бухт Золотой Рог и Диомид отличалась низкими значениями общей биомассы, видового богатства и разнообразия, но высокой плотностью поселения животных; снижением числа фаунистических групп за счет элиминации чувствительных организмов (иглокожих, ракообразных, моллюсков) и преобладанием толерантных к загрязнению видов полихет и форонид. Высокая плотность поселений бентоса создается за счет массового развития мелких организмов – экологически пластичных видов полихет, имеющих короткий жизненный цикл и высокие темпы репродукции.

По мере снижения антропогенной нагрузки сообщества макрозообентоса становятся более разнообразными. Наряду с толерантными, короткоциклическими оппортунистическими видами в сообществах появляются виды бентоса с длительным жизненным циклом, чувствительные к качеству среды. Так, в проливе Босфор Восточный основа биомассы бентоса формируется двустворчатыми моллюсками (79,3 %), а заметную долю от численности (19,4 %) составляют офиуры. В пробах нередко встречаются десятиногие раки *Pinnixa rathbuni*, *Scyra quadridens*, кумовые раки и амфиподы. Несмотря на высокое загрязнение донных осадков, бентос пролива отличается видовым и количественным обилием и разнообразием, вероятно благодаря активной гидродинамике, водообмену с открытой частью залива, присутствию смешанных осадков и благоприятному кислородному режиму.

Долговременные изменения бентоса

Регулярные гидробиологические наблюдения на акватории порта начали выполнять в середине 70-х гг. на станциях Общегосударственной службы наблюдений и контроля (ОГСНК). Однако эти данные практически не опубликованы, за исключением работы Э.В. Багавеевой [1], где приводятся данные по видовому составу многощетинковых червей бухт Золотой Рог, Диомид и пролива Босфор Восточный за период с 1979 по 1981 г. Анализ видового состава свидетельствовал, что подавляющее число видов полихет бухт Золотой Рог и Диомид относилось к категории нечувствительных к загрязнению видов, т. е. видов-индикаторов загрязнения – *Sch. japonica*, *Polydora* sp., *A. pacifica*, *C. capitata*, *Cirratulus cirratus*. В проливе Босфор Восточный также доминировал толерантный вид *Sch. japonica* [1, 27].

Наблюдения, выполненные специалистами ДВНИГМИ на тех же станциях в 1986–1988 гг. в бухте Золотой Рог, показали, что в кутовой части бухты живые

организмы бентоса отсутствовали. «Мертвая зона» в этой части бухты регистрировалась и в 2001, и в 2019 гг. В 2016 г. на ст. Z-1 присутствовал только один вид – *C. capitata*.

В период с 1986–1988 гг. и до 2019 г. бентос бухты отличался очень низкими величинами биомассы и значениями индексов, характеризующих видовое богатство и разнообразие, а также высокой плотностью поселения (табл. 4). Доминирующие виды менялись от года к году, но были представлены исключительно видами-индикаторами загрязнения.

Таблица 4. Сравнительная характеристика бентоса бухты Золотой Рог по годам

Годы	1986–1988	2001	2016	2019
Кол-во проб	15	6	5	14
Доминирующие виды (экз./м ²)	<i>Capitella capitata</i> , <i>Nereis vexillosa</i> , <i>Schistomeringos japonica</i>	<i>Aphelochaeta pacifica</i>	<i>Aphelochaeta pacifica</i> , <i>Schistomeringos japonica</i>	<i>Aphelochaeta pacifica</i> , <i>Paradialychone cincta</i> , <i>Schistomeringos japonica</i>
B	17,7 ± 24,0	10,8 ± 7,7	17,2 ± 10,0	49,3 ± 11,6
A	221,8 ± 291,9	1 483,2 ± 977,0	758,0 ± 269,6	4 846,8 ± 2 397,4
S	4,2 ± 2,2	4,2 ± 1,0	4,2 ± 1,0	9,0 ± 1,4
R	0,4 ± 0,2	0,4 ± 0,1	0,5 ± 0,1	1,0 ± 0,1
H	1,4 ± 0,6	1,4 ± 0,3	0,9 ± 0,3	1,3 ± 0,2

Примечание. B – биомасса, A – численность, S – число видов, R – индекс видового богатства, H – индекс видового разнообразия. Приведены средние значения ± стандартная ошибка.

Как показывают многочисленные исследования, экстремальное загрязнение донных отложений в бухтах формирует специфические сообщества видов, выносящих высокие концентрации загрязняющих веществ. Такие сообщества отмечали в загрязненных прибрежных акваториях залива Петра Великого – бухтах Находка, Врангеля, Новицкого, Козьмино, Чажма в середине 90-х годов, а также в восточной части Амурского залива по настоящее время [1, 2, 3, 4, 19, 25, 28]. Структура и количественные характеристики видов таких сообществ очень близки. Основу донного населения формировали перечисленные выше толерантные виды, среди которых максимальной плотностью поселения и частотой встречаемости отличался один из видов-оппортунистов – полихета *A. pacifica*.

Бентос пролива Босфор Восточный демонстрирует высокие значения как биомассы, так и плотности поселения, за исключением таковых в 2001 г., когда отмечалась очень низкая величина общей биомассы (табл. 5). На протяжении всего периода исследования наблюдаются высокие значения индексов видового богатства и разнообразия. Среди доминирующих видов встречены как чувствительные к загрязнению виды (*O. sarsii*), так и индикаторы загрязнения (*A. pacifica*, *Ch. setosa*).

Известно, что состав и распределение бентосных животных определяется глубиной места, гранулометрическим составом донных отложений и, соответственно,

Таблица 5. Сравнительная характеристика бентоса пролива Босфор Восточный по годам

Годы	2001	2016	2019	2021	2022
Кол-во проб	8	8	10	6	4
Доминирующие виды (экз./м ²)	<i>Aphelochaeta pacifica</i>	<i>Ophiura sarsii vadicola</i>	<i>Aphelochaeta pacifica</i> , <i>Chaetozone setosa</i>	<i>Ophiura sarsii vadicola</i>	<i>Ampharete sibirica</i>
B	33,3 ± 14,8	382,5 ± 81,0	542,5 ± 137,4	553,4 ± 148,9	443,4 ± 206,9
A	3207,2 ± 724,	1591,3 ± 355,7	2155,5 ± 690,5	1911,7 ± 348,7	2340,0 ± 826,2
S	20,5 ± 2,2	15,5 ± 1,7	18,9 ± 1,2	18,3 ± 2,5	20,0 ± 2,0
R	2,5 ± 0,3	2,0 ± 0,2	2,5 ± 0,1	2,3 ± 0,3	2,5 ± 0,3
H	2,8 ± 0,3	2,4 ± 0,1	3,0 ± 0,3	2,5 ± 0,4	2,5 ± 0,3

Примечание. B – биомасса, A – численность, S – число видов, R – индекс видового богатства, H – индекс видового разнообразия. Приведены средние значения ± стандартная ошибка.

содержанием органики. В конце прошлого столетия появился еще один фактор, непосредственно влияющий на структуру сообществ бентоса, – химическое загрязнение донных осадков. При этом акватории вблизи Владивостока подвержены не только химическому, но и органическому загрязнению.

По данным специалистов ДВНИГМИ, полученным в 2019 г. [12], 94 % обследованной акватории испытывают воздействие органического вещества. Содержание органики находится на уровне пороговых значений и даже превышает их в несколько раз. Данный факт отмечен как в бухтах Золотой Рог, Диомид, так и в проливе Босфор Восточный. Однако максимальные значения зафиксированы в бухте Золотой Рог, где верхняя граница – 35 мг/г [22] – превышена в 2–3 раза.

По содержанию загрязняющих веществ в донных осадках акватории морского порта выделены четыре области, различающиеся по уровню и характеру антропогенной нагрузки, и два донных сообщества. Связь между структурой сообществ и уровнем загрязнения прослеживается при экстремально высоком и высоком загрязнении – в бухтах Золотой Рог и Диомид. Это полузакрытые акватории со слабым водообменом, илистыми грунтами, с высокими концентрациями органического углерода, ОСНУ и других токсикантов.

Рассматривая одно только воздействие нефтяных углеводородов, следует отметить, что, согласно имеющимся данным, обратимые изменения в донных сообществах начинаются при значении ОСНУ 0,01–0,10 мг/г. Начиная с концентрации 1,0–4,0 мг/г, происходит значительное снижение обилия и видового разнообразия бентоса, а также 50 % гибель животных в токсикологических экспериментах [11, 13]. Риск снижения видового богатства бентоса существенно возрастает также при содержании органического углерода в грунтах >35 мг/г [22].

Как следствие, в наиболее загрязненных районах – бухтах Золотой Рог и Диомид – донные сообщества характеризовались как низкой биомассой, так и низким видовым и таксономическим разнообразием и преобладанием толерантных к загрязнению видов полихет. Такие сообщества макрозообентоса

существуют на исследованной акватории в течение многих десятилетий, точнее – уже более 50 лет.

В умеренно загрязненных и слабо загрязненных участках донное население отличается высокими значениями биомассы, видового и таксономического разнообразия, доминированием видов с длительным жизненным циклом.

Заключение

Результаты экспедиции 2019, 2021–2022 гг. позволили оценить уровень загрязнения акваторий морского порта и определить особенности видового состава и обилия донной фауны. Наиболее загрязненными и экологически неблагополучными являлись бухты Золотой Рог и Диомид. Донные сообщества этих бухт характеризовались низким разнообразием и биомассой, а также исключительным преобладанием оппортунистических видов. Средние величины биомассы, числа видов и экологических индексов в бухтах Золотой Рог и Диомид были самыми низкими по сравнению с таковыми в проливе Босфор Восточный.

Экстремально высокий уровень загрязнения морской среды бухт Золотой Рог и Диомид обусловил формирование типичного для загрязненных полузамкнутых акваторий сообщества бентоса, в котором преобладает комплекс экологически пластичных видов полихет, имеющих короткий жизненный цикл и высокие темпы репродукции. Это так называемые виды-пионеры, виды, которые первыми осваивают нарушенные субстраты и, благодаря своей плодовитости, создают высокую плотность поселения. Чувствительные к загрязнению виды в таких условиях снижают свою численность вплоть до полного исчезновения. Эти изменения хорошо прослеживаются на примере бентоса бухт Золотой Рог и Диомид.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список видов придонной макрофауны акватории морского порта Владивосток по данным 2019, 2021–2022 гг.

Тип Priapulida

Priapulus caudatus Lamarck

Тип Nemertea

Cerebratulus marginatus Renier, Nemertea Indet.

Тип Annelida

Класс Polychaeta

Ampharete sibirica (Wiren), Ampharetidae Indet., *Anobothrus gracilis* Malmgren, *Aphelochaeta pacifica* (Annenkova), *Bispira* sp., *Capitella capitata* (Fabricius), Chaetopteridae Indet., *Chaetozone setosa* Malmgren, *Cheilonereis cyclurus* (Harrington), *Chone* sp., *Cirratulus cirratus* (O.F. Muller), *Cistenides* sp., *Dipolydora cardalia* Berkeley, *Eteone longa* (Fabricius), *Eteone* sp., *Eteone spetsbergensis* Malmgren, *Eulalia bilineata* Johnston, *Glycera capitata* Orsted, *Glycinde armigera* Moore, *Goniada maculata* Orsted, *Harmothoe imbricata* (Linnaeus), *Idanthyrsus macropaleus* (Schmarda), *Lepidonotus helotypus* (Grube), Lumbrineridae Indet., *Magelona longicornis* Johnston, *Maldane sarsi* Malmgren, Maldanidae Indet., *Melinna elisabethae* McIntosh, *Mysta ornata* (Grube), Nereidae Indet., *Nereis* sp., *Nereis vexillosa* Grube, *Notomastus latericeus* Sars, *Onuphis* sp., *Owenia collaris* Hartman, *Paradialychone cincta* (Zachs), *Pectinaria* sp., *Pherusa plumosa* (O.F. Muller), *Pholoe minuta* (Fabricius), *Phyllodoce groenlandica* Orsted,

Phyllodocidae Indet., *Pilargis pacifica* Zachs, Polynoidae Indet., *Potamilla* sp., *Prionospio malmgreni* Claparede, *Pseudopotamilla reniformis* Bruguier, *Scalibregma inflatum* Rathke, *Schistomeringos japonica* (Annenkova), *Scoletoma longifolia* (Imajima & Higuchi), *Scoloplos armiger* (O.F. Muller), *Sigambra bassi* Hartman, Spionidae Indet., *Spiophanes uschakowi* Zachs, Terebellidae Indet.

Тип Arthropoda

Порядок Isopoda

Synidotea cinerea Gurjanova

Порядок Pantopoda

Nymphon sp.

Порядок Cumacea

Diastylis alaskensis Calman, *Diastylis paralaskensis* Vassilenko & Tzareva

Порядок Amphipoda

Eohaustorius eous (Gurjanova), Gammaridae Indet., *Grandifoxus longirostris* (Gurjanova), *Monoculodes latimanus* (Goës), *Westwoodilla rectangulata* Bulyceva.

Порядок Decapoda

Argis dentata (Rathbun), *Crangon amurensis* Braznikov, Decapoda Indet., *Pinnixa rathbuni* Sakai, *Scyra quadridens* (De Haan)

Подкласс Cirripedia

Balanus sp.

Порядок Leptostraca

Nebalia bipes (Fabricius)

Тип Mollusca

Класс Gastropoda

Limalepeta lima (Dall), *Lottia* sp., *Margarites costalis* (A. Gould), *Neptunea constricta* (Dall), *Philine orientalis* A. Adams, *Rhodopetoma erosa* (Schrenck)

Класс Bivalvia

Axinopsida subquadrata (A. Adams), *Corbula venusta* A. Gould, *Cymatoica orientalis* (Dall), *Ennucula tenuis* (Montagu), *Hiatella arctica* (Linnaeus), *Macoma calcarea* (Gmelin), *Macoma nipponica* (Tokunaga), *Macoma scarlatoi* Kafanov & Lutaenko, *Macoma* sp., *Macoma tokyoensis* Makiyama, *Mizuhopecten yessoensis* (Jay), *Modiolus* sp., *Mya truncata* Linnaeus, *Mya uzenensis* Nomura & Zinbo, *Mytilus trossulus* A. Gould, *Periploma* sp., *Protocallithaca adamsi* (Reeve), *Raeta pulchella* (Adams et Reeve), *Theora lubrica* Gould, *Thracia kakumana* (Yokoyama), *Yoldia bartschi* Scarlato.

Тип Phoronida

Phoronida Indet.

Тип Echinodermata

Asterias amurensis Lutken, *Ophiopholis aculeata* (Linnaeus), *Ophiura sarsii* Lutken, *Ophiura sarsii vadicola* Djakonov.

Литература

1. Багавеева Э.В. К экологии многощетинковых червей бухты Золотой Рог (Японское море) // Исслед. фауны морей, 1992. – Т. 43 (51). – С. 115–129.

2. Белан Т.А. Сравнительная характеристика условий среды и показателей сообществ макрозообентоса морских прибрежных акваторий вблизи Владивостока // Юбилейный вып. ДВНИГМИ – 65 лет. Владивосток: Дальнаука, 2015. – С. 156–171.

3. Белан Т.А. Особенности обилия и видового состава бентоса в условиях загрязнения (залив Петра Великого, Японское море): Дис. ... канд. биол. наук. Владивосток: ДВГУ, 2001. – 150 с.

4. Давыдкова И.Л., Фадеева Н.П., Ковековдова Л.Т., Фадеев В.И. Содержание тяжелых металлов в тканях доминирующих видов бентоса и в донных осадках бухты Золотой Рог Японского моря // Биология моря, 2005. – Т. 31. – № 3. – С. 202–206.

5. Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям (Японское море) за 2021 год. Владивосток: ПУГМС, 2022. – С. 215.

6. Комаров А.В. Научные основы мониторинга состояния недр шельфа России. Автореф. дисс. на соиск. степ. докт. геол.-минералогич. наук. Москва: ВИМС, 2006. – 48 с.

7. Лучин В.А., Кислова С.И., Круз А.А. Тенденции долгопериодных изменений в водах залива Петра Великого // Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России. Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 33–50.

8. Методические указания. Определение загрязняющих веществ в пробах морских донных отложений и взвеси // РД 52.10.556–96. М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1996. – 56 с.

9. Морской экспедиционный мониторинг гидрологического и гидрохимического состояния акваторий дальневосточных морей, морей восточной Арктики, северо-западной части Тихого океана: отчет о НИР / отв. исп. Т.А. Белан // Владивосток: ДВНИГМИ, 2022. – 126 с.

10. Морской экспедиционный мониторинг гидрологического и гидрохимического состояния акваторий дальневосточных морей, морей восточной Арктики, северо-западной части Тихого океана: отчет о НИР / отв. исп. Т.А. Белан // Владивосток: ДВНИГМИ, 2023. – 84 с.

11. Обзорная информация. Нефтяные углеводороды в морских донных отложениях: химические и биологические аспекты / Под. Ред. И.А. Шлыгина // Обнинск, 1986. — 46 с.

12. Оценка долговременных тенденций изменения состояния и уровня загрязнения морей Российской Федерации по гидрохимическим и гидробиологическим показателям на основе данных государственного мониторинга: отчет о НИР / отв. исп. Т.А. Белан // Владивосток: ДВНИГМИ, 2020. – 224 с.

13. Патин С.А. Экологические проблемы освоения нефтегазовых ресурсов морского шельфа // М.: ВНИРО, 1997. – 349 с.

14. Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений // Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 239 с.

15. Севастьянов А.В., Лишавская Т.С., Чаткина Т.В. Гипоксия придонных вод прибрежных районов залива Петра Великого. // Тр. ДВНИГМИ. – Вып. 154. – 2012. – С. 226–245.

16. Стоник И.В. Качественный и количественный состав фитопланктона бухты Золотой Рог Японского моря // Изв. ТИНРО, 2018. –Т. 194. – С. 167–174. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-194-167-174.

17. Тищенко П.П., Звалинский В.И., Михайлик Т.А., Тищенко П.Я. Гипоксия залива Петра Великого // Изв. ТИНРО, 2021. – Т. 201. – Вып. 3. – Р. 600–639. DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-600-639.

18. Шорников Е.И., Зенина М.А. Остракоды как индикаторы состояния и динамики водных экосистем (на примере залива Петра Великого Японского моря) // Владивосток: Дальнаука, 2014. – 334 с.

19. Фадеев В.И., Фадеева Н.П. Воздействие загрязнения на донные сообщества в районах крупных портов Дальнего Востока // Реакция морской биоты на изменения природной среды и климата / ред. А.В. Адрианов. Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 81–90.
20. Boyd J., Baumann J., Hutton K., Bertold S., Moore B. Sediment Quality in Burrard Inlet Using Various Chemical and Biological Benchmarkers // Burrard Inlet Environmental Action Program. Burnaby. B.C. – 1998. – 87 p.
21. Belan T.A. Benthos abundance pattern and species composition in conditions of pollution in Amursky bay (the Peter Bay, the Sea of Japan) // Mar. Pollut. Bull. – 2003. – Vol. 49. – N. 9. – Pp. 1111–1119.
22. Hyland J., Bathis L., Karakassis I., Magni P., Petrov A., Shine J., Vestergaard O., Warwick R. Organic carbon content as an indicator of stress in the marine benthos // Mar. Ecol. Prog. Ser. — 2005. — Vol. 295. — Pp. 91–103.
23. Grassle I.P., Grassle I.F. Sibling species in marine pollution indicators *Capitella capitata* (Polychaeta) // Science. 1976. – Vol. 192. – No. 4329. – Pp. 567–569.
24. Gray J.S., Pearson T.H. Objective selection on sensitive species indicative of pollution-induced change in benthic communities. I. Comparative methodology // Mar. Ecol. Prog. Ser. – 1982. – Vol. 9. – № 2. – Pp. 111–119.
25. Kasyanov V.L., Kamenev G.M., Tarasov V.G., Fadeev V.I. The current status of marine bottom communities of Nakhodka Bay // International Conference on the Sustainability of Coastal Ecosystems in the Russian Far East, 1996. – Abstracts. – Pp. 31–32.
26. Long E.R., Macdonald D.D., Smith S.L., Calder F.D. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments // Environment Management. – 1995. – Vol. 19. – Pp. 81–97.
27. Levings C.D., Anderson E.P., O’Connell G.W. Biological effects of dredged-material disposal in Alberni Inlet // Wastes in the Ocean. Malabar, Publ. Co. – 1985 – Vol. 6. – Pp. 131–155.
28. Naumov Yu.A. Ecological State of Nakhodka // International Conference on the Sustainability of Coastal Ecosystems in the Russian Far East, 1996. – Abstracts. – Pp. 51–52.
29. Pearson T.H. and Rosenberg R. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment // Oceanogr. Mar. Biol. Rev. – 1978. – № 16. – Pp. 229–311.
30. Rygg, B. Effects of sediment copper on benthic fauna // Mar. Ecol. Prog. Ser. – 1985a. – Vol. 25. – № 1. – Pp. 83–89.
31. Rygg, B. Distribution of species along pollution-induced diversity gradients in benthic communities in Norwegian Fjords // Mar. Pollut. Bull. – 1985b. – Vol. 16. – № 12. – Pp. 469–474.
32. Tkalin A.V., Belan T.A., Shapovalov E.N. The state of the marine environment near Vladivostok, Russia // Mar. Pollut. Bull. – 1993. – Vol. 26. – № 8. – Pp. 418–422.
33. UNEP: Statistical analysis and interpretation of marine community data. Reference Methods for Marine Pollution Studies // UNEP, 1995. № 64.

Аннотации

УДК 551.461:551.468(265.5)

Текущее состояние и перспективы развития системы прогнозирования тропических циклонов ФГБУ «ДВНИГМИ» / Крохин В.В. // Труды ДВНИГМИ. – Вып. 157, 2024

Представлено текущее состояние технологии численных прогнозов тропических циклонов (ТЦ) северо-западной части Тихого океана на основе выходной продукции модели HWRF-III-Ru. Приведены статистические оценки качества прогноза ТЦ по модели HWRF-III-Ru. Также рассматриваются перспективы развития системы численного прогнозирования ТЦ на базе модели HWRF-IV-Ru с улучшенным пространственным разрешением и обновленными физическими параметризациями.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, технология прогноза, тропические циклоны, WRF, северо-западная часть Тихого океана, оценка качества.

Табл. 1. Ил. 5. Библ. 20.

Current state and development prospects of the tropical cyclone forecasting system of FERHRI / Krokhin V.V. // FERHRI Issues – No. 157, 2024.

Current state of typhoons numerical prediction technology based on HWRF-III-Ru model is described. Recent verification statistics and evaluations of HWRF-III-Ru model are presented. Prospects for development of typhoons numerical prediction technology based on HWRF-IV-Ru model with improved spatial resolution and updated physical parametrizations have been studied.

Key words: numerical weather prediction, forecasting technology, tropical cyclones, WRF, Northwest Pacific Ocean Basin.

Табл. 1. Fig. 5. Bibl. 20.

УДК 551.5:001.891.57

Прогноз опасных для авиации явлений погоды на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России / Вербицкая Е.М., Крохин В.В., Романский С.О. // Труды ДВНИГМИ. – Выпуск 157, 2024.

В статье представлены результаты работ по созданию методов и технологий выпуска краткосрочных прогнозов опасных для авиации явлений погоды для территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Это метеорологические условия обледенения воздушных судов с выделением зон умеренной и высокой интенсивности; наличие и интенсивность турбулентности в ясном небе; наличие и интенсивность горных волн; наличие и интенсивность пыльных и песчаных бурь. Указанные технологии прогнозирования основаны на выходной продукции модели Weather Research and Forecasting рассчитанной на сетках различного пространственно-временного разрешения. Работы выполнены по Плану НИТР Росгидромета (тема 1.4.2) в период 2020–2024 годов.

Ключевые слова: численный прогноз погоды для обеспечения авиации, турбулентность, горные волны, обледенение, пыльные бури, WRF, Восточная Сибирь, Дальний Восток.

Табл. 6. Ил. 13. Библ. 28.

Numerical forecasting of hazardous for aviation weather events on Eastern Siberia and Russian Far East / Verbitskaya E.M., Krokhin V.V., Romanskiy S.O. // FERHRI Issue. – No. 157, 2024.

In the article, results of a work to develop methods and technologies of short-term forecasting of hazardous for aviation weather events on Eastern Siberia and Russian Far East are

presented. Among them are meteorological conditions are favorable to aircraft icing including selection of moderate and severe icing zones; existence and intense of mountain waves; existence and intense of clear air turbulence; existence and intense of dust and sand storms. These forecasting technologies are based on output of Weather Research and Forecasting model which is calculated on grids of different spatial-temporal resolution. Work is performed according to the Roshydromet scientific plans (theme 1.4.2) for 2020–2024.

Key words: numerical weather prediction for aviation, turbulence, mountain wave, icing, dust storm, WRF, Eastern Siberia, Russian Far East

Tabl. 6. Fig. 13. Bibl. 28.

О качестве прогнозов новой системы краткосрочного численного прогнозирования погоды «Хаб-5» в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока России. / Вербицкая Е.М., Романский С.О. //Труды ДВНИГМИ. – Выпуск 157, 2024.

В статье представлены оценки качества прогнозов всех основных элементов погоды (приземного давления, температуры, точки росы и ветра), а так же полусуточных сумм осадков, рассчитанных по модели Weather Research and Forecasting (WRF) – Advanced Research WRF (WRF–ARW) с горизонтальным шагом 5 км и 51 вертикальным уровнем в пунктах Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Прогнозы рассчитаны за до-статочного продолжительный период времени (с июня 2022 г. по декабрь 2023 г). Выполнено сравнение с оценками качества прогнозов по оперативной модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 15 км и 31 уровнем по вертикали. Обсуждаются преимущества новой версии модели и сделан вывод о целесообразности её внедрения в оперативную практику РСМЦ Хабаровск для прогнозов общего пользования и специализированных (в частности, авиационных) прогнозов.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, опасные явления погоды, качество прогнозов погоды, модель WRF-ARW, Восточная Сибирь, Дальний Восток

Табл. 5. Ил. 1. Библ. 15.

Forecasts' quality of numerical weather prediction system of “Khab-5” at the points of Eastern Siberia and Russian Far East / Verbitskaya E.M., Romanskiy S.O. // FERHRI Issue. – No. 157, 2024. 2024.

Quality assessment of short-term forecasts (T2m, Td2m, Ps, V10m, 12-hour precipitation) by numerical weather prediction system (NWP) “Khab-5” at the stations of Eastern Siberia and the Russian Far East is presented. The forecasts are reviewed for the period beginning June, 2022 through December, 2023. NWP system of “Khab-5” is based on Weather Research and Forecasting model with 5 km grid spacing. It is concluded that “Khab-5” may replace the operational numerical weather prediction system of “Khab-15” with 15 km grid spacing.

Key words: numerical weather prediction, hazard weather phenomena, forecast's quality, WRF, Eastern Siberia, Russian Far East

Tabl. 5. Fig. 1. Bibl. 15.

УДК 551.553.21 (265.5)

Тенденции в ходе элементов атмосферной циркуляции на Дальнем Востоке в последние десятилетия / Мезенцева Л.И., Друзь Н.И., Гончуков Л.В. // Труды ДВНИГМИ – Вып. 157, 2024.

Исследуются параметры атмосферной циркуляции над прибрежными районами Дальнего Востока во второй половине 20-го и в начале 21-го веков. Для объективной

оценки параметров атмосферной циркуляции рассчитаны индексы: усредненные нормированные значения атмосферного давления по выделенным районам Дальнего Востока и нормированные разности атмосферного давления между смежными районами суши и моря (муссонные индексы). Выявлено, что интенсивность муссонной циркуляции в прибрежной зоне Дальнего Востока продолжительный период была слабой, что относится как к летней, так и зимней фазам муссона. К активному состоянию летняя муссонная циркуляция первой половины лета вернулась в 2005 г., второй половины лета – в 2013 г., чему способствовало развитие амурской депрессии. Зимняя муссонная циркуляция к устойчивому обострению вернулась в 2003 г., при этом картина сильно размыва за счет относительно слабого развития муссона второй половины зимы.

Ключевые слова: индекс циркуляции атмосферы, центр действия атмосферы, муссон, депрессия, климатическая тенденция, Дальний Восток.

Ил. 9. Библ. 13.

Trends of the recent decades atmosphere circulation variables development in the Far East/ Mezentseva L.I., Druz N.I., Gonchukov L.V.// Publications of FERHRI – No. 157, 2024.

Atmosphere circulation variables over the Russian Far East coastal areas are reviewed during the period beginning the second half of the 20th century through the beginning of the 21st century. The following indices are calculated for unbiased evaluation: standardized averages of atmosphere pressure for selected areas of the Far East and standardized atmosphere pressure varieties between neighboring land and sea areas (monsoon indices). It is found that monsoon circulation intensity over the coastal areas of the Far East was light for the extended period of time during both summer and winter monsoon stages. Monsoon first half of summer active circulation period started in 2005, whereas the second half of summer active circulation period started in 2013, that was stimulated by the Amur area depression development. Winter monsoon circulation labile sharpening started in 2003, and the general picture is strongly diffused due to comparatively weak development of the second half of winter monsoon.

Key words: atmosphere circulation index, atmospheric action center, monsoon, depression, climatic trend, Far East

Fig. 9. Bibl. 13.

УДК 551.515(589)

Синоптические аспекты атмосферных процессов и погодных условий на территории Приморского края в августе 2023 г. / Л.И. Мезенцева, Глубоков Н.В., Каптюг В. А, Котович Н.Г., Перунова Т.А., Бугаец А.Н., Лупаков С.Ю. // Труды ДВНИГМИ. – 2024.– Вып. 157.

Выполнен анализ погодных условий на территории Приморского края в августе 2023 г. Выявлено, что они носили экстремальный характер, а синоптические условия крайне отличались от средних многолетних. Сильные продолжительные дожди и последовавшие дождевые паводки были обусловлены совокупным воздействием атмосферного фронта, волновых циклонов и циклонов тропического происхождения. Наблюдалось доминирование меридиональных форм циркуляции.

Ключевые слова: погодные условия, сильный дождь, экстремальность климата, синоптический анализ, Приморский край.

Ил. 11. Библ. 8.

Synoptic considerations of atmospheric processes and weather conditions in the Primorsky kray territory in August of 2023/ Mezentseva L.I., Glubokov N.V., Kaptyug V.A., Kotovich N.G., Perunova T.A., Bigaets A.N., Lupakov S. Yu.// Publications of FERHRI – No. 157, 2024.

Analysis of Primorskiy territory weather conditions in August of 2023 is presented. Its extreme pattern is confirmed, and synoptic conditions differed greatly from the multi-year averages. Heavy continuous rainfalls and following floods were generated by joint impact of atmospheric front, wave cyclones and tropical cyclones. Latitudinal circulation prevalence is stated.

Key words: weather conditions, heavy rainfall, extreme climate, synoptic analysis, Primorskiy territory

Fig. 11. Bibl. 8.

УДК 551.466.33

Качество карт анализа волнения Тихого океана / Вражкин А.Н. // Труды ДВНИГМИ – Вып. 157, 2024.

Рассмотрены варианты карт состояния поверхности моря Японского метеорологического агентства и Центра океанического прогноза США, более известные как факсимильные. Выполнено сравнение высоты волн с данными спутниковых альтиметрических измерений. Получены выводы о занижении волнения на картах ЖМА и завышении областей максимума на американских.

Ключевые слова: высота волн, спутниковые измерения, оценка качества.

Табл. 1. Ил. 2. Библ. 3.

The quality of the maps of wave analysis for Pacific ocean / Vrazhkin A.N. // FERHRI Issuer – No. 157, 2024.

The of sea-state analysis from the Japan Meteorological Agency and the HWS/NCEP Ocean Prediction Center, better known as facsimile maps, are considered. The wave heights compared with the data of satellite altimetry measurements. Conclusions were obtained about the underestimation of wave in maps of JMA and the overestimation of maximum in OCP.

Keywords: significant wave height; satellite measure; verification.

Tabl. 1. Fig. 2. Bibl. 3.

УДК 551.461:551.467(265.51)

Морские наводнения на побережье Олюторского залива (западное побережье Берингова моря) в ледовый период / Любицкий Ю.В., Вражкин А.Н. // Труды ДВНИГМИ – Вып. 157, 2024.

Населенные пункты, расположенные на побережье Олюторского залива, часто затопляются при наличии на акватории Берингова моря ледяного покрова. В последние годы повторяемость этого опасного явления существенно увеличилась. Основными факторами, вызывающими морские наводнения в исследуемом районе в ледовый период, являются прилив, волновой нагон и накат, роль ветрового нагона менее значима. Наводнения возникают при наличии прибрежной полыньи (чистая вода или начальные виды льда в прибрежной зоне), зыби юго-западного направления, приходящей к берегу под ледяным покровом, полной воде прилива.

Ключевые слова: наводнение, побережье Олюторского залива, ветровой нагон, прилив, волновой нагон, накат, ледяной покров.

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 15.

Marine floods on the coast of Olyutorsky Bay (western coast of the Bering Sea) during the ice period / Lyubitskiy Yu.V., Vrazhkin A.N. // FERHRI Issues – No. 157, 2024.

Settlements located on the coast of Olyutorsky Bay are often flooded when there is ice cover in the Bering Sea. In recent years, the frequency of this dangerous phenomenon has increased significantly. The main factors causing sea flooding in the study area during the ice period are the tide, set-up and run-up, the role of wind surge is less significant. Floods occur when there is a shore polynya (ice-free or new ice in the coastal zone), a southwesterly swell coming to the shore under the ice cover, high tide.

Keywords: flood, Olyutorsky Gulf coast, wind surge, tide, set-up, run-up, ice cover
Table 1. Fig. 3. Bibl. 15.

УДК 551.465(265.52)

Особенности режима поверхностных течений в прибрежных районах тихоокеанского побережья полуострова Камчатка / Любицкий Ю.В., Шпачук Д.Р. // Труды ДВНИГМИ. – Вып. 157, 2024.

По материалам инструментальных наблюдений анализируются характеристики суммарных, приливных, непериодических и квазистационарных течений в слое глубиной 0–25 м. Скорости суммарных поверхностных течений от материкового склона к берегу уменьшаются, так как в мористой части исследуемого района проходит Камчатское течение, влияние которого с приближением к берегу ослабевает. Неустойчивость квазистационарных течений по направлению свидетельствует о наличии вихревых структур. Режим приливных течений определяется морфометрией района. В прибрежной зоне большие оси эллипсов основных приливных волн главным образом ориентированы вдоль береговой черты, вблизи пролива между Авачинским заливом и Авачинской губой заметен поворот этих осей в направлении, соответствующем ориентации пролива. Скорости непериодических течений могут достигать значительной величины (25–30 см/с). На некоторых гидрологических станциях идентифицированы инерционные колебания скоростей течений, в основном, возникающие после прохождения над морем циклонов.

Ключевые слова: поверхностное течение, тихоокеанское побережье Камчатки, суммарное течение, квазистационарное течение, приливное течение, непериодическое течение.

Табл. 1. Ил. 8. Библ. 24.

Peculiarities of the near-surface current regime in the coastal areas of the Pacific coast of the Kamchatka Peninsula / Lyubitskiy Yu.V., Shpachuk D.R. // FERHRI Issue. – No. 157, 2024.

Based on instrumental observations, the characteristics of summary, tidal, non-periodic and quasi-stationary currents in a layer with a depth of 0–25 m are analyzed. The speeds of the summary near-surface currents from the continental slope to the coast decrease, since the Kamchatka Current passes through the seaward part of the study area, the influence of which weakens as it approaches the coast. The instability of quasi-stationary currents in direction indicates the presence of vortex structures. The regime of tidal currents is determined by the morphometry of the area. In the coastal zone, the major axes of the ellipses of the main tidal waves are mainly oriented along the coastline; near the strait between Avacha Gulf and Avacha Bay, a rotation of these axes in the direction corresponding to the orientation of the strait is noticeable. The velocities of non-periodic currents can reach significant values (25–30 cm/s). At some

hydrological stations, inertial fluctuations in current speeds have been identified, mainly arising after cyclones pass over the sea.

Keywords: near-surface current, Pacific coast of Kamchatka, summary current, quasi-stationary current, tidal current, non-periodic current.

Table 1. Fig. 8. Bibl. 24.

УДК 551.46.062.01

Основные результаты совместного анализа измерений уровня моря в прибрежной зоне различными измерительными средствами / Манько А.Н. // Труды ДВНИГМИ – Вып. 157, 2024.

Рассматриваются результаты совместного анализа измерений уровня моря в прибрежной зоне гидростатическими датчиками и поплавковыми самописцами уровня моря (СУМ) и данные гидростатических датчиков Aanderaa 3791a, Seba-DS22 (гидростатический датчик), МК-26-4 в сравнении с данными цифрового поплавкового датчика (Seba поплавковый). Анализ данных показал, что гидростатические датчики обеспечивают заявленную точность наблюдений в течении 1–3 лет. В дальнейшем ухудшение качества наблюдений может проявляться в виде трендовых изменений, запаздывании регистрации данных, резких изменений в показаниях уровня моря. Сделан вывод, что данные гидростатических датчиков обеспечивают преимущество в наблюдениях за уровнем моря при переходе к автоматизированным средствам наблюдений. Эксплуатация гидростатических датчиков должна сопровождаться постоянным контролем данных. Одним из решений данной задачи является установка дублирующего датчика, что позволит автоматизировать этот процесс, снизить процент отбракованных данных.

Ключевые слова: уровень моря, автоматизированные средства измерений, гидростатический датчик.

Табл. 3. Ил. 3. Библ. 7.

Key simultaneous analysis insights of sea level measurements in the coastal area by various measurement tools/Manko A.N.// Publications of FERHRI – No. 157, 2024.

Key simultaneous analysis insights of sea level measurements in the coastal area by hydrostatic (pressure) sensor and float-type mareographs (FTM) and the data of hydrostatic sensors Aanderaa 3791a, Seba DS22 and МК-26-4 compared to the data of a digital float-type sensor (float-type Seba) are reviewed. Data analysis confirmed that hydrostatic sensors provide the claimed observation accuracy for 1–3 years. Further, degraded observations quality manifests itself in trend changes, data registration lag time, and sea level values rapid change. It is concluded that hydrostatic sensors data provide consistency of sea level observations in transit to computer-aided observation facilities. Hydrostatic sensors employment should be supported by regular data control. A slave sensor installation is one of the problem solutions to automate the process and diminish the volume of discarded data.

Key words: sea level, computer-aided measurement facilities, hydrostatic sensor

Tabl.3. Fig. 3. Bibl. 7.

УДК 551.46.062.01

Оценки цунамиопасности побережья залива Петра Великого на основе численного моделирования / А.Н. Манько, М.Г. Диденко, В.Н. Храмушин // Труды ДВНИГМИ – Вып. 157, 2024.

Рассматриваются результаты численного моделирования длинных волн в заливе Петра Великого, инициируемых сейсмическими очагами подводных землетрясений в различных районах цунамигенной зоны вдоль западного побережья Японских островов. Вычислительные эксперименты проводились с использованием программного обеспечения лаборатории вычислительной гидромеханики и морских исследований Сахалинского государственного университета. Проведена верификация модели по материалам наблюдений фактического цунами 26 мая 1983 г. В результате проведенных экспериментов установлено, что наибольшая высота волн цунами в заливе Петра Великого наблюдается от очагов землетрясений, расположенных в районах с координатами 38° с. ш., 136° в. д. и 40° с. ш. 139° в. д., 40° с. ш. Высоты волн составили 1,6 м и 1,0 м соответственно. На основе анализа распространения фронта волны показано, что в первом случае возвышенность Ямато вызывает деформацию фронта волны, после прохождения которой происходит концентрация волновой энергии и увеличение высоты волны цунами в районе залива Петра Великого. Для второго района характерна минимальная деформация фронта волны, тогда как севернее и южнее наблюдается ослабление волновой энергии, и, соответственно, уменьшение высот волн цунами. Показано, что при подходе волн цунами к материковому склону на дальнейшее распространение волн в заливе Петра Великого оказывают влияние ложбины (каньоны) материкового склона.

Ключевые слова: цунами, залив Петра Великого, вычислительный эксперимент.

Табл. 1. Ил. 10. Библ. 16.

Peter the Great bay coastal line tsunami risk assessment by numerical modeling/Manko A.N., Didenko M.G., Khramushin V.N.//Publications of FERHRI– No. 157, 2024.

The results of the Peter the Great bay long waves numerical modeling is under review. The long waves are generated by seismic centers of underwater earthquakes in various tsunami risk areas along the western coast of Japan islands. Simulation experiments were performed by the software of the computational fluid mechanics and marine study laboratory, Sakhalin state university. The model verification was performed by tsunami actual observation dated May 26, 1983. It is found that the maximum tsunami waves height in the Peter the Great bay is confirmed in earthquake centers located at 38° N, 136° E and 40° N, 139° E, 40° N. Waves heights are 1.6 and 1.0 m respectively. Wavefront advance analysis confirms that Yamato submarine elevation causes wavefront transformation and results in wave energy concentration and wave height rise in the Peter the Great bay area. Wavefront deformation is minimum in the second area, whereas wave energy is less northwards and southwards, and it results in tsunami wave heights reduction. It is stated that continental shelf canyons effect waves distribution in the Peter the Great bay when tsunami waves approach the continental shelf.

Key words: tsunami, Peter the Great bay, simulation experiment

Tabl. 1. Fig. 10. Bibl. 16.

УДК 551.462(265.54)

Рельеф дна для исследований океанографии Японского моря / Данченков М.А. // Труды ДВНИГМИ. – Вып.157, 2024.

Рассмотрены существующие взгляды на подводную топографию Японского моря. По модельным сеточным данным (GEBCO Gridded Bathymetry Data) построены схемы рельефа дна разных частей моря и разрезы (по параллелям и меридианам) глубин. Проведен их анализ. В таблицах приведены цифровые характеристики котловин, желобов и основных поднятий. Особое внимание уделено их названиям.

Ключевые слова: рельеф дна, океанография, Японское море

Табл. 4. Ил.12. Библ. 18.

Bathorography for the Sea of Japan oceanographic survey//Danchenkov M.A./ Publications of FERHRI– No. 157, 2024.

The review of the Sea of Japan underwater topography is done. GEBCO Gridded Bathymetry Data is used to do bathorography patterns of various parts of the sea and profiles obtained by deep seismic sounding with further analyses. Tables provide numerical values of watersinks, penstocks and basic elevations. Their name are reviewed.

Key words: bathorography, oceanography, the Sea of Japan

Tabl. 4. Fig. 12. Bibl. 18.

УДК 556.5

Методический подход к расчету допустимых погрешностей уровня для определения оправдываемости прогнозов дождевых паводков на реках Приморья. /Сидоренко Н.Ю.// Труды ДВНИГМИ. – Вып.157, 2024.

В работе представлен подход к расчету допустимых погрешностей уровней рек бассейна р. Усури с замыкающим створом у п. Кировский для определения оправдываемости прогнозов дождевых паводков. При расчете допустимых погрешностей предложено оценивать методику гидрологического прогноза только значимого, с точки зрения оперативной практики, диапазона уровней воды, нижний предел которого определяет начало и конец паводка.

Ключевые слова: водосбор, гидрологический прогноз, допустимая погрешность

Табл. 3. Ил. 4. Библ. 6.

Procedural framework of permissible surface level miscalculation for rainfall floods in Primorye rivers forecast verification/ Sidorenko N. Yu.// Publications of FERHRI – No. 157, 2024.

Management of permissible surface level miscalculation of Ussuri river basin with the outlet nearby Kirovskiy settlement for rainfall floods forecast verification is provided. When identifying permissible miscalculation, it is advised to assess the procedural framework of hydrological forecast of significant water level range with minor level determining the beginning and the end of a flood.

Key words: reception basin, hydrometric forecast, permissible error

Tabl. 3. Fig. 4. Bibl. 6.

УДК 504.42

О возможности применения в практике экологического мониторинга общих характеристик наиболее представительных таксономических групп макрозообентоса / Мощенко А.В. // Труды ДВНИГМИ. – Выпуск 157, 2024.

На основе применения стандартных процедур нелинейного оценивания и eNOF моделирования показано, что в настоящее время существует два приемлемых варианта применения в практике экологического мониторинга общих характеристики таксономических групп макрозообентоса. Во-первых, это определение координат пороговых точек ERLq и ERMq, которые ограничивают область прогрессивной деградации донного населения – почти линейного падения моделей изменения индексов видового богатства Маргалефа и разнообразия Шеннона-Винера вдоль градиента общего уровня химического загрязнения грунтов (TPFchem), а также ERDq – координаты точки, правее которой наступает полная

деградация макрозообентоса. Во-вторых, это использование усредненных внутригрупповых координат точек оптимумов встречаемости, плотности поселения и биомассы агломераций, выделенных в результате классификации таксономических групп по отношению к загрязнению. При интерпретации оба этих способа дают сходные результаты, которые почти идентичны таковым, получаемым при применении ПДУ, а также ERLq и ERMq, определяемым на основе обобщенной функции состояния сообществ донной фауны (различия соответствующих показателей лежат в пределах вычисления TPFchem – 0,2 усл. ед.). Кроме того, они позволяют выполнять картирование водоемов, что удобно, например, для визуального восприятия экологического состояния морских акваторий, как в целом, так и их отдельных участков.

Ключевые слова: мониторинг, залив Петра Великого, экологическое состояние, загрязнение, эвтрофикация, донные отложения, таксономические группы, макрозообентос. Табл. 5. Ил. 19. Библ. 45.

On the possibility of using in the practice of environmental monitoring the general characteristics of the most representative taxonomic groups of macrozoobenthos / Moshchenko A.V. // FERHRI Issuer – No. 157, 2024.

On the basis of application of standard procedures of nonlinear estimation and eHOF modeling it is shown that at present there are two acceptable variants of application in practice of ecological monitoring of general characteristics of taxonomic groups of macrozoobenthos. First, it is the determination of coordinates of threshold points ERLq and ERMq, which limit the area of progressive degradation of bottom population, the almost linear fall of models of change in Margalef species richness and Shannon-Wiener diversity indices along the gradient of the total level of chemical pollution of sediments (TPFchem), as well as ERDq, the coordinate of the point to the right of which complete degradation of macrozoobenthos occurs. Second, is the use of the averaged within-group coordinates of the points of optimums of occurrence, settlement density and agglomeration biomass identified by classifying taxonomic groups in relation to contamination. When interpreted, both these methods give similar results, which are almost identical to those obtained by applying MPL, as well as ERLq and ERMq, determined on the basis of the generalized state function of benthic fauna communities (the differences of the corresponding indices lie within the limits of TPFchem calculation – 0,2 units). In addition, they allow mapping of water bodies, which is convenient, for example, for visual perception of the ecological state of marine areas, both as a whole and their certain areas.

Key words: Monitoring, Peter the Great Bay, ecological state, pollution, eutrophication, bottom sediments, taxonomic groups, macrozoobenthos.

Table 5. Fig. 19. Bibl. 45.

УДК 551.352:547.52

Условия среды и состояние макрозообентоса на акватории морского порта Владивосток / Белан Т.А., Борисов Б.М., Круц А.А., Кадун Е.А., Калюкина А.В.// Труды ДВНИГМИ. – Выпуск 157, 2024.

Приведены данные по уровню химического загрязнения донных отложений и показателям макрозообентоса акваторий морского порта Владивосток в 2019, 2021–2022 гг. Рассмотрены многолетние изменения в донном населении. Показано, что структура и обилие бентоса отражают различный уровень антропогенной нагрузки на отдельные районы акватории. Выделены наиболее загрязненные участки залива, рассмотрены особенности видового состава и обилия донного населения в условиях загрязнения.

Ключевые слова: макрозообентос, загрязнение донных отложений, залив Петра Великого, Японское море.

Табл. 5. Ил. 3. Библ. 33.

Environment and macrozoobenthos conditions in the waters of Vladivostok Sea Port/ Belan T.A., Borisov B.M., Kruts A.A., Kadun E.A., Kalyukina A.V.// Publications of FERHRI – No. 157, 2024.

The data on the level of benthic deposits chemical pollution and macrozoobenthos values in the waters of Vladivostok sea port in 2019, 2021–2022 is provided. Multi-year changes in benthos population are reviewed. It is stated that structure and volume of benthos corresponds to the level of anthropogenic load intensity in some water areas. The most polluted areas of the bay are identified; species composition characteristics and benthos volume under pollution is reviewed.

Key words: macrozoobenthos, benthos pollution, Peter the Great bay, the Sea of Japan.

Tabl. 5. Fig. 3. Bibl. 33.

Научное издание

ТРУДЫ

Федерального государственного бюджетного учреждения
«Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт»
(ФГБУ «ДВНИГМИ»)

**ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выпуск 157

Компьютерная верстка *С.В. Филатов*

Подписано к печати 2024 г.
Формат 70х100/16. Усл. п. л. . Уч.-изд. л. .
Тираж экз. Заказ

Издательство ООО «Дальнаука»
690106, г. Владивосток, пр. Красного Знамени, 10, каб. 27
Тел. 8(924) 26-30-160. E-mail: dalnauka@mail.ru
<http://www.dalnauka.ru>

Отпечатано в ООО «ПСР95»
г. Владивосток, ул. Русская, 65, корпус 10