

НАО «Казахский национальный университет имени аль-Фараби»

УДК 551.46, 551.466.3

на правах рукописи

ЕЛТАЙ АЙЗАТ ҒАЛИҚЫЗЫ

**Исследование ветрового волнения на Каспийском море на основе
численного моделирования**

6D061000 – Гидрология

Диссертация на соискание степени доктора философии (Ph.D)

Научные консультанты
Ph.D, старший преподаватель
Нарбаева Каракоз Турсынбековна,
Ph.D, профессор университета Оулу,
Финляндия
Бьорн Клове

Республика Казахстан
Алматы, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	3
СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ	10
1.1 Гидрометеорологическое описание казахстанской части Каспийского моря.....	11
1.2 Краткая климатическая характеристика казахстанской части Каспийского моря.....	19
2 ИЗУЧЕННОСТЬ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА КАСПИЙСКОМ МОРЕ.....	25
2.1 Наблюдения за волнением.....	25
2.2 Научные исследования.....	29
3 ВЕТРОВЫЕ УСЛОВИЯ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ВОЛНЕНИЕ НА КАСПИЙСКОМ МОРЕ.....	32
3.1 Анализ скорости ветра по данным наблюдений.....	32
3.2 Анализ скоростей ветра по данным ДЗЗ.....	35
3.3 Направление ветра.....	39
3.4 Штормовые ветра.....	44
4 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ...	49
4.1 Характеристика волнения на основе наземных наблюдений....	50
4.2 Характеристика волнения на основе данных ДЗЗ.....	53
4.3 Численное моделирование волнения на открытой акватории моря.....	58
4.3.1 Общая характеристика спектрально-волновой модели SWAN.....	59
4.3.2 Результаты численных экспериментов с использованием модели SWAN на открытой акватории моря.....	63
5 РАЙОНИРОВАНИЕ АКВАТОРИЙ МОРЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ МОРЕПЛАВАНИЯ.....	85
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	90
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	93
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	118

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В диссертационной работе применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Ветровые волны –	волны, видимая форма которых перемещается в пространстве;
Высота волны –	превышение вершины волны над соседней подошвой на волновом профиле;
Дифракция волн –	искривление фронтов и изменение высот бегущих волн, огибающих препятствия (сооружения, острова, мысы и др.);
Длина волны –	горизонтальное расстояние по лучу волны между вершинами двух смежных гребней на волновом профиле;
Климат –	средний режим погоды или статистическое описание средней величины и изменчивости соответствующих количественных параметров (чаще всего, температура, осадки и ветер) в течение периода времени, которое может изменяться от нескольких месяцев до тысячи и миллионов лет.
Крутизна волны –	отношение высоты волны к ее длине;
Период волны –	интервал времени между прохождением двух смежных вершин волн через фиксированную вертикаль;
Расчетные элементы волны –	элементы волны заданной обеспеченности в системе расчетного шторма;
Рефракция волн –	искривление фронтов и изменение высот бегущих волн под воздействием течений или обусловленное изменением глубины на мелководье;
Скорость распространения волн –	скорость перемещения гребня волны в главном направлении ее распространения;
Средняя крутизна волны –	отношение средней высоты волн в системе к средней длине;

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

В диссертационной работе применяются следующие сокращения и обозначения:

АПС	–	автономная гидрометеорологическая станция
БС	–	Балтийская система
В	–	восток
в.д.	–	восточная долгота
ВНИИГМИ	–	Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации
ВСВ	–	всемирное скоординированное время
ГГИ	–	Государственный гидрологический институт
ГМ	–	гидрометеорологическое
ГМС	–	гидрометеорологическая станция
ГОИН	–	Государственный океанографический институт
ГТС	–	гидротехническое сооружение
ДЗЗ	–	дистанционное зондирование Земли
ЕК	–	Европейская комиссия
ЕКА	–	Европейское космическое агентство
ЕСИМО	–	Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане
ЕЦСПП	–	Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды
З	–	запад
ИО РАН	–	Институт океанографии им. П.П. Ширшова Российской академии наук
ИСП	–	интегрированная система прогнозирования
КАСПКОМ	–	Координационный Комитет по гидрометеорологии Каспийского моря
М	–	морская станция
МГ	–	морская гидрологическая станция
МГП	–	морской гидрологический пост
МГУ	–	Московский государственный университет
МС	–	метеорологическая станция
НГМС	–	Национальная гидрометеорологическая служба
РФ	–	Российская Федерация
С	–	север
СВ	–	северо-восток
СВЧ	–	микроволновое излучение
СГВ	–	Среднее гринвичское время
СГМС	–	специализированная гидрометеорологическая станция
СЗ	–	северо-запад
с.ш.	–	северная широта

о.	–	остров
УГМС	–	Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Ю	–	юг
ЮВ	–	юго-восток
ЮЗ	–	юго-запад
CMIP6	–	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
CNES	–	Centre National d'Études Spatiales
ESA	–	European Space Agency
ESOC	–	European Space Operations Centre
EUMETSAT	–	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
GEBCO	–	The General Bathymetric Chart of the Oceans
ISRO	–	Indian Space Research Organization
MODIS	–	Moderate resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
NCEP/NCAR	–	
NOAA	–	National Oceanic and Atmospheric Administration
SWAN	–	Simulating Waves Nearshore
WAM	–	Wave Modelling

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация посвящена исследованию ветрового волнения на Каспийском море, пространственно-временному распределению его характеристик по казахстанскому сектору и районированию акватории казахстанской части моря по степени волнения за ретроспективный период и на будущее до 2050 г.

Актуальность диссертационного исследования. Акватория Каспийского моря, относящаяся к Казахстану, входит в сферу стратегических интересов страны в экономическом, транспортном и инфраструктурном плане. Так, у побережья моря, начиная с 1963 года, были проведены работы по созданию порта Актау, а в рамках исполнения указа президента от 11 ноября 2014 года «Нурлы жол – путь в будущее» в части становления Казахстана крупнейшим деловым транзитным региональным хабом, а также в рамках реализации проекта «Новый Шелковый путь» был создан порт Курык.

В свою очередь в Прикаспийском регионе успешно развиваются нефтегазовая отрасль республики и расположены три крупнейших месторождения нефти и газа: Тенгиз, Карачаганак, Кашаган. Согласно данным Министерства Энергетики Республики Казахстан, объем добычи нефти в 2022 году составил 29,2 млн тонн, 11,2 млн тонн, 12,7 млн тонн, газа 16,1 млрд. м³, 19,4 млрд. м³, 8,1 млрд. м³ соответственно на вышепредставленных месторождениях. Транспортировка нефти на экспорт производится по различным нефтепроводам (Например, Каспийский Трубопроводный Консорциум, Казахстан-Китай), также через морской порт Актау (по маршруту транспортировки Актау — Баку, Актау — Махачкала).

Прибрежные районы подвергаются совокупным действиям нескольких факторов: повышение или понижение уровня моря, увеличение частоты стихийных явлений, разрушению берегов. Развитие технических средств освоения морской акватории (добыча нефти и газа), морского флота, необходимость сохранения биоразнообразия привело к возрастающему интересу всестороннего исследования Каспийского моря, в том числе гидрометеорологических процессов.

В связи с этим, информация об опасных, особо опасных и стихийных гидрометеорологических явлениях, как штормовые ветра, волнение, сгонно-нагонные изменения уровня моря и др.), является востребованной при проведении работ на море, проектировании сооружений на открытой акватории и на побережье, для обеспечения безопасного плавания гражданского и военного флота.

Штормовые волнения могут причинить большой экономический ущерб. Кроме того, изучение волнового режима необходимо для прогнозирования изменения характеристик волнения в целях обеспечения безопасности плавания на море и для накопления натуральных данных о волнении, используемых при теоретических исследованиях в этой области. Этим обуславливается актуальность исследования волновых процессов.

Выполнение любых расчетов, которые связаны с параметрами волнения, затруднены отсутствием продолжительных рядов наблюдений, которые в свою очередь ведутся визуально, в связи с этим в основном различные характеристики волнения определяются в результате применения статистического или численного моделирования.

Цель исследования – изучить процесс ветрового волнения на море, расчет его пространственно-временного изменения в настоящее время и в будущем на основе численного моделирования с применением спектрально-волновой модели SWAN на основе данных ДЗЗ.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- Анализ термических и гидродинамических процессов на акватории Каспийского моря по наблюдаемым данным;
- Разработка «Каталога сильного волнения» по данным ветрового волнения с наблюдательных станций и постов;
- Ретроспективные расчеты характеристик ветрового волнения с применением численного моделирования за многолетний период, анализ и определение особенностей пространственно-временной изменчивости параметров ветрового волнения;
- Расчеты изменения высоты волны на будущее на основе данных климатических проекции моделей СМIP6 до 2050 г. по сценариям изменения климата SSP1.26 и SSP5.85;
- Создание карт пространственно-временного распределения высоты и направления волнения за многолетний ретроспективный период и высоты волны на будущее до 2050 г.;
- Районирование территории казахстанского сектора Каспийского моря по степени волнения.

Объект исследования: казахстанская часть Каспийского моря.

Предмет исследования: динамика изменения характеристик ветрового волнения на открытой акваторий Каспийского моря.

Научная новизна исследования определяется следующим:

- Проведена качественная и количественная оценка пространственно-временных изменений характеристик ветра и волнения казахстанского сектора Каспийского моря по данным ДЗЗ (альтиметрия, реанализ), расчетных данных моделей (SWAN, ECWAM);
- Созданы карты пространственно-временного распределения высоты волны на акватории Каспийского моря по результатам численного моделирования с применением модели SWAN и характеристик ветра по данным реанализа ERA5 за 1959–2021 гг. и климатическим проекциям моделей СМIP6 на будущее до 2050 г.;
- Проведены расчеты изменения высоты волны до 2050 г. по основным пунктам наблюдений в казахстанском секторе Каспийского моря;
- Разработана карта районирования акватории казахстанского сектора Каспийского моря по степени волнения.

Положения, выносимые на защиту:

- Новые представления о характере ветрового режима Каспийского моря по данным прибрежных наблюдений и ДЗЗ: выявлена тенденция уменьшение средней скорости ветра; при преобладании восточных, юго-восточных, северных направлений ветра и их количества в северо-восточной части моря;

- Разработка «Каталога сильного волнения», позволило оценить особенности волновых характеристик в казахстанском секторе Каспийского моря и особенностей их сезонного распределения;

- Новые представления о характере волнения на открытой акватории казахстанского сектора Каспийского моря, выявленного на основе численного моделирования с применением данных реанализа ERA5 и моделей изменения климата CMIP6;

- Построены карты зонирования акватории Каспийского моря по степени волнения.

Личный вклад автора заключается в решении поставленных задач диссертационного исследования, в частности:

- В проведении качественной и количественной оценки пространственно-временных изменений характеристик ветра и волнения казахстанского сектора Каспийского моря;

- В разработке и создании серии карт, схем функционального зонирования районов;

- В подготовке и публикации полученных научных результатов по тематике проведенного исследования в рейтинговых журналах. Основные положения научных статей отражены в разделах диссертации на соискание ученой степени Ph.D.

Апробация исследования. Основные результаты диссертационной работы были доложены:

- 17th CAS-TWAS-WMO Forum (2018, Пекин, Китай);

- International Symposium on Water and Land Resources in Central Asia (2018, Алматы, Казахстан);

- Конференция «Ломоносов-2019» (2019, Москва, Россия);

- II Всероссийская научно-практическая конференция, приуроченная к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования ИГУ (2019, Иркутск, Россия);

- международная научная конференция «Изменение климата в регионе Каспийского моря», (2021, Астрахань, Россия);

- IV Международная научная конференция Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии) («Опасные явления – IV») памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова: материалы (2022, Ростов-на-Дону, Россия).

- International Scientific Conference «Global Challenges for Global Science II» (2022, София, Болгария).

По материалам диссертационного исследования опубликовано 23 печатных работы, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в базу Scopus, 6 статей в республиканских научных журналах из перечня Комитета по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 11 статей в материалах международных конференций, 2 статьи в научных изданиях.

Структура диссертации. Диссертация изложена на 159 страницах и состоит из определений, обозначений и сокращений, введения, 5 разделов, заключения и списка использованных источников из 180 наименований, из них 53 на иностранных языках; содержит 28 таблиц, 47 рисунков и 3 приложения.

1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Каспийское море – самый большой по площади замкнутый водоем мира. При отметке уровня моря минус 27,5 м БС его площадь составляет 386,4 тыс. км², объем вод – 78,5 тыс. км³, наибольшая глубина – 1025 м. Уровень моря в настоящее время на 28 м ниже уровня океана. Главными орографическими единицами побережья являются: на севере – Прикаспийская низменность, на западе – горы Восточного Предкавказья и Большого Кавказа с узкой прибрежной низменностью [1, 2].

Каспийское море расположено на границе двух крупных частей единого материка Евразии в 47° 07' с.ш. и 54° 03' в.д. Его воды омывают берега Российской Федерации, Республики Казахстан, Туркменистана, Исламской республики Иран, Республики Азербайджан [1] (рисунок 1.1 [3]).

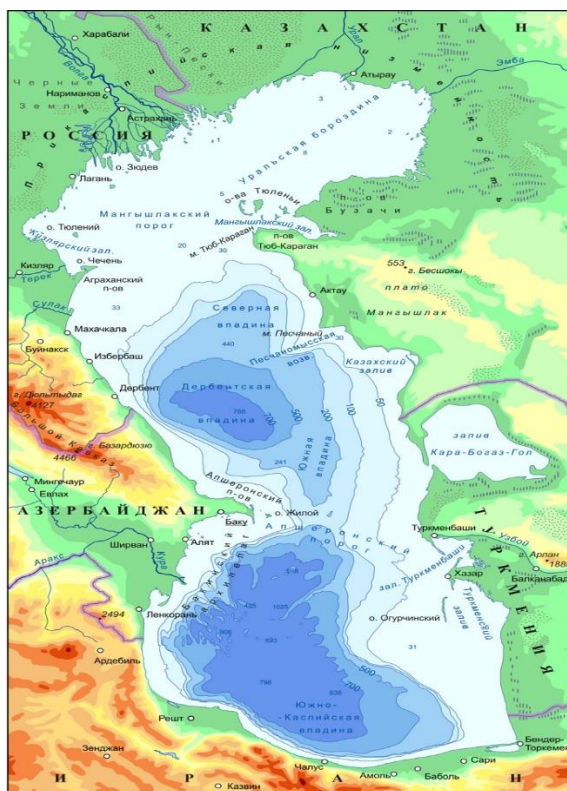


Рисунок 1.1 – Физико-географическая карта региона Каспийского моря [3]

Общая протяженность береговой линии составляет 5970 км. Наибольшую протяженность береговой линии (без островов) имеет Казахстан – 2320 км, Туркменистан – 1200 км, Иран – 900 км, Азербайджан – 850 км и Россия – 700 км. Протяженность моря с севера на юг составляет 1030 км [4].

Размеры Каспийского моря зависят от изменения уровня моря, который в свою очередь зависит от характеристик водного баланса [5]. По расчетам на 2021 год при среднем фоновом уровне моря минус 28,43 м БС [6], площадь моря составила 368 542 км², объем 77 917 км³.

Площадь водосбора равняется 3,1 млн. км², из которой около 30 % приходится на бессточные области [2].

Каспийское море питается водами более 130 больших и малых рек, ежегодно поставляющих в него около 300 км³ воды. Из рек, впадающих в Каспийское море, основное место занимает Волга, площадь бассейна которой составляет 1 360 тыс. км². Вторая по величине река Жайык (Урал) с площадью бассейна в 237 тыс. км² [7, 4].

Сток, впадающих в Каспийское море рек, полностью зарегулирован. На р. Волга крупнейшими водохранилищами являются Иваньковское (1937 г.), Волгоградское (1958–1960 гг.), Куйбышевское (1955–1957 г.), Рыбинское (1940–1949 гг.), Саратовское (1967–1968 гг.), Чебоксарское (1982–1985 гг.), на реке Жайык Ириклинское водохранилище. Основным судоходным каналом является Волго-Каспийский, длиной 210 км, расположенный в дельте реки Волги и Каспийского моря [7]. Внутригодовое распределение естественного стока Волги неравномерное – за три весенних месяца проходит в среднем 30 % годового количества воды, за зиму (декабрь-март) – всего около 11 %. В настоящее время волжский сток регулируется в пределах годового цикла водохранилищами Волжско-Камского Каскада [7].

Основными реками, впадающими в Каспийское море на территории Казахстана, являются река Жайык и Жем (Эмба). Река Жайык начинается четырьмя постоянно действующими ключами на склонах Урал-Тау (Южный Урал) [8, 10]. Водный режим рек характеризуется высоким весенним половодьем и низкой летней меженью с редкими дождевыми паводками. Наибольшие годовые расходы наблюдаются во второй половине апреля и лишь изредка в мае. Доля весеннего стока колеблется от 62 % до 81 % [7].

На реке Жайык [12, 13] наибольший годовой расход воды в 14000 м³/с наблюдался 27-28 апреля 1957 года [12]. Основными факторами влияющими на величину весеннего стока, следовательно, и годового стока являются снегозапасы в бассейне реки к началу таяния, осадки в виде дождя в период половодья, степень увлажнения и глубина промерзания почво-грунтов водосбора, интенсивность снеготаяния [8, 10].

Вторая по значимости река Жем с длиной 712 км и площадью бассейна в 40,4 тыс. км². Река Жем берет свое начало на западных склонах Мугоджарских гор, на высоте 350 м над уровнем моря и протекает по территориям Актюбинской и Атырауской областей. Сток реки в основном формируется в верхней, возвышенной части водосбора. В среднем течении она имеет преимущественно транзитный сток, а в нижнем происходит рассеивание стока. Река очень редко доходит до Каспийского моря [10, 11].

1.1 Гидрометеорологическое описание казахстанской части моря

Уровень моря.

Для Каспийского моря характерны циклические колебания уровня моря, которые в основном обусловлены климатическими и антропогенными факторами (рисунок 1.2) [4, 14]. Систематические наблюдения за уровнем

Каспийского моря начаты в 1830 г. Наиболее достоверные сведения об уровне Каспийского моря имеются с 1900 г. За период систематических наблюдений с 1900 г. по 2021 г. он изменялся от минус 25,74 м БС до минус 29,01 м БС.



Рисунок 1.2 – Колебания уровня Каспийского моря за период 1900–2021 гг.

В 1900-1930 гг. наблюдалось высокое положение уровня моря, в среднем около отметки минус 26,07 м БС. В 1930-1940 гг. происходило постепенное снижение уровня моря от минус 26,07 м БС (1930 г.) до минус 27,79 м БС (1940 г.). С 1941 г. по 1977 г. наблюдался период продолжения падения уровня моря, менее интенсивное чем в предыдущий, но в 1977 году уровень моря достиг исторического минимума в минус 29,01 м БС. Падение уровня было связано с тем, что с середины 30-х годов на реках Каспийского бассейна началось интенсивное водохозяйственное строительство, влияние которого стало наиболее ощутимо в 50-е годы. К началу 70-х годов практически все крупные реки бассейна были зарегулированы. В результате этого уменьшился объем речного стока, и изменилось его внутригодовое распределение. Кроме того, в этот период началось интенсивное развитие орошаемого земледелия и проведение агротехнических мероприятий [15, 16].

В период 1977-1995 гг. наблюдалось повышение уровня моря. За это время уровень моря повысился на 2,5 м и в 1996 г. достиг отметки минус 26,62 м БС [17, 15, 18]. Средняя интенсивность подъема уровня за этот период составила около 14 см в год, а в отдельные годы доходила до 36 см. Наиболее интенсивное повышение уровня моря наблюдалось в 1979 г. (0,31 м), в 1990 г. (0,36 м), в 1991 г. (0,29 м) и в 1994 г. (0,28 м).

Начиная с 2006 г., уровень Каспийского моря имеет тенденцию к снижению. Средняя интенсивность спада уровня составляет 10 см в год, а в отдельные годы доходила до 25 см. Одними из причин данного снижения уровня моря является выпадение минимального количества осадков с 2006 года на акваторию Каспийского моря, повышение температуры воздуха из-за изменения климата повлияло на ускорение процессов испарения, а также нескольких маловодных лет в бассейне реки Волги и Жайыка.

В 2021 г. отметка уровня моря составила минус 28,43 м БС, а в декабре 2021 г. доходил до отметки минус 28,68 м БС [6]. В 2022 г. уровень моря снизился до отметки минус 28,70 м БС.

Сгонно-нагонные явления.

Северо-восточная часть, особенно ее прибрежная зона, характеризуется наличием сгонно-нагонных колебаний уровня моря, формирующихся под воздействием барических градиентов и связанных с ними ветров над морем. Здесь в среднем за один месяц отмечается 3–4 нагона и 4–5 сгонов, поэтому 80–85 % времени береговая черта у восточного побережья Северного Каспия неустойчива и практически все время изменяется. Подъемы уровня моря, обусловленные штормовыми нагонами и спады из-за сгонов, могут приводить к подтоплению или осушению прилегающих территорий и разрушению портовых, гидротехнических и других прибрежных объектов [19].

Анализ сгонно-нагонных явлений проведен с использованием данных морских станций и постов, расположенных в казахстанской части Каспийского моря с 1940 г. по 2021 г. [21, 20]. Динамика изменения количества наблюдаемых сгонно-нагонных явлений показывает, что в последние 10 лет, как сгонные, так и нагонные явления наблюдаются чаще (рисунок 1.3). В период 2012–2021 гг. наблюдалось 27 % (162 явления) нагонных явлений в северной части моря и 75 % (332 явления) в средней части моря, прилегающей к Казахстану от общего его количества. В этот же период количество сгонных явлений от общего количества составляло 43 % (198 явления) для Северного Каспия и 66 % (163 явления) для Среднего Каспия.

В целом, данные наблюдений показали, что на станциях М Пешной, МГ Кулалы остров, МГ Форт-Шевченко и МГ Актау, в период до 1990 г. наблюдалось 327 нагонных явлений и 212 сгонных явлений, однако после 1990 г. их количество увеличилось, и стало 407 и 406 соответственно.

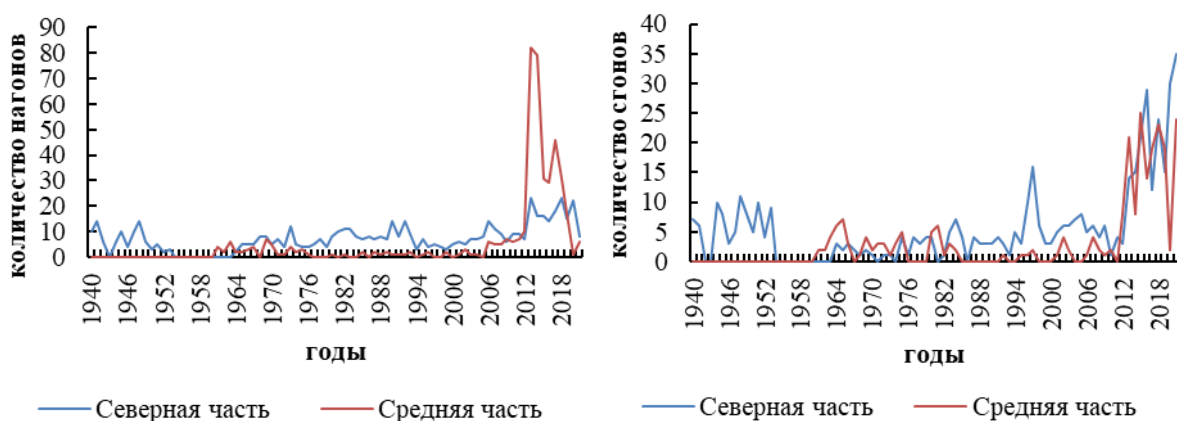


Рисунок 1.3 – Динамика изменения сгонно-нагонных явлений в казахстанском секторе Каспийского моря

Во внутригодовом распределении нагонные явления чаще наблюдаются в октябре-декабре и с марта по май (М Пешной – октябрь (72), МГП Жанбай – апрель (6), МГ Кулалы остров – октябрь (9), МГ Форт-Шевченко – декабрь (10), МГП Саура – март (22), МГ Актау – март (8), МГП Фетисово – апрель, май (24) (рисунок А.1 приложения А). По сезонам года однонаправленных тенденций не наблюдается, так в северо-восточной части моря нагоны преобладают весной и осенью, а в Среднем Каспии зимой, весной и осенью.

В свою очередь чаще сгонные явления в казахстанской части Каспийского моря наблюдались весной и осенью: М Пешной – октябрь (57), МГП Жанбай – июнь, сентябрь (4), МГ Кулалы остров – август, сентябрь (9), МГ Форт-Шевченко – ноябрь (11), МГП Саура – январь, сентябрь, декабрь (5), МГ Актау – октябрь (7), МГП Фетисово – июнь (6). В сезонном разрезе можно сказать, что наибольшее количество сгонных явлений наблюдалось зимой – на МГП Саура (35 %), весной – на МГ Актау (27 %), МГП Фетисово (26 %), летом на МГП Жанбай (43 %) и осенью на МГ Актау (45 %) (рисунок А.1 приложения А).

В казахстанской части Каспия средняя высота нагонов в многолетнем разрезе изменяется от 0,25 м до 0,52 м. Максимальная высота подъема в 131 см наблюдалось в октябре 1967 года на М Пешной максимальный спад в 184 см наблюдался там же в марте 1946 года (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Характеристики сгонно-нагонных явлений

Станция	Высота подъема, см		Высота спада, см	
	среднее	максимум	среднее	максимум
М Пешной	55	184	51	131
МГП Жанбай	36	100	24	51
МГ Кулалы остров	43	69	33	57
МГ Форт-Шевченко	28	72	27	60
МГ Актау	25	50	31	67
МГП Саура	22	54	22	38
МГП Фетисово	25	58	23	51

За период наблюдений за сгонно-нагонными явлениями на МГ Кулалы остров, МГ Актау, МГ Форт-Шевченко, МГП Фетисово и МГП Саура высота подъема и спада не превышала 100 см. На МГП Жанбай из 23 случаев нагона только в 1 случае наблюдался подъем на 100 см в апреле 2008 года. По данным станции М Пешной из 576 нагонов за рассматриваемый период (1940–2021 гг.) высота нагона в 100 см и более наблюдалось в 18 случаях, из которых 5 приходилось на апрель, по 3 – в мае, октябре и декабре, по 1 – в июне, июле, марте. Из 441 сгонов на М Пешном наблюдено только 10 случаев с падением уровня моря на 100 и более см: октябрь 1953 – 119 см, октябрь 1967 – 131 см, июнь 1996 – 115 см, сентябрь 2015 – 117 см, ноябрь 2017 – 114 см, декабрь 2017 – 106 см, август 2020 – 105 см, 123 см, декабрь 2020 – 104 см, июнь 2021 – 110 см.

Согласно критериям опасности сгонно-нагонных явлений [21] критических (до 50 см) изменений уровня моря наблюдается больше остальных (таблица 1.2). Так в Северном Каспии это 292 нагона и 264 сгона, а в Среднем Каспии наблюдалось 409 нагонных и 231 сгонных явлений. Реже всего наблюдаются особо опасные сгонно-нагонные явления на акватории северо-восточной части Каспия.

На М Пешной максимальная высота подъема нагона наблюдалась в марте (184 см), на МГ Кулалы остров максимальная высота 69 см была в ноябре, на МГ Актау наивысший подъем в 50 см в июне, на МГ Форт-Шевченко наивысший подъем в 72 см наблюдался в декабре, на МГП Жанбай максимальная высота нагона в 100 см наблюдалась в апреле, на МГП Саура максимум нагона в 54 см был в марте, на МГП Фетисово наибольшая высота нагона наблюдалась в ноябре 58 см.

Таблица 1.2 - Количество случаев сгонно-нагонных явлений по градациям высоты сгона и нагона

	0.15-0.49	0.5-0.64	0.65-0.99	более 1
нагон				
М Пешной	273	176	109	18
МГП Жанбай	19	1	2	1
МГ Кулалы остров	37	17	1	
МГ Форт-Шевченко	64	6	1	
МГ Актау	31	1		
МГП Саура	96	1		
МГП Фетисово	181	3		
сгон				
М Пешной	244	101	86	10
МГП Жанбай	20	1		
МГ Кулалы остров	50	7		
МГ Форт-Шевченко	85	2		
МГ Актау	26	5	2	
МГП Саура	37			
МГП Фетисово	33	1		

Анализ сгонных явлений показал, что на М Пешной максимальный спад был в октябре (131 см), в МГП Жанбай – в июле (51 см), на МГ Кулалы остров максимум спада в наблюдался в январе и августе (57 см), на МГ Актау – в январе и ноябре (67 см), на МГ Форт-Шевченко – в октябре (60 см), на МГП Сауре – в марте (38 см), на МГП Фетисово наибольшее падение на 51 см наблюдалось в марте.

Температура воды.

Температура воды в казахстанском секторе моря по данным государственной наблюдательной сети в среднем многолетнем разрезе колеблется от 10,7 °С на северо-востоке (М Пешной) до 11,5 °С в Среднем Каспии (МГ Актау) (рисунок 1.4) [22].

Низкие температуры воды в Северной части моря связаны с влиянием стока рек Волга и Жайык.

Во внутригодовом распределении температуры воды прослеживается одинаковый ход по всем станциям и постам.

Максимум наблюдается летом (июль-август) и в многолетнем разрезе составляет для М Пешной 35,6 °С (2000 г.), для МГ Кулалы остров 33,7 °С (1977 г.), для МГ Форт-Шевченко 33,6 °С (2005 г.), для МГ Актау 30,8 °С (1977 г.). Минимум температуры воды отмечается в холодный период года (январь-февраль).

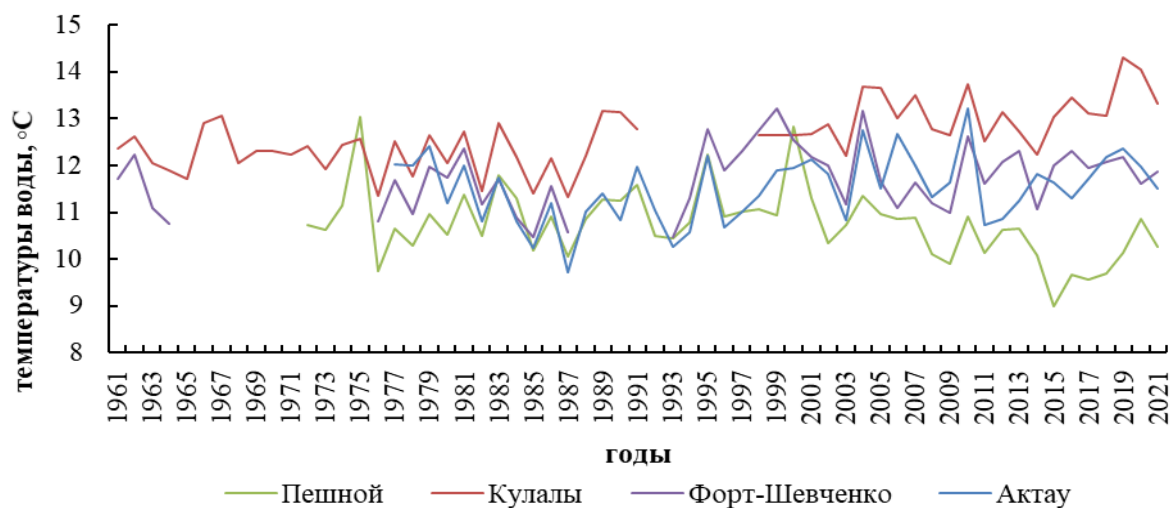


Рисунок 1.4 - Температура воды на Каспийском море по данным наблюдательной сети за 1961–2021 гг.

Проанализированные данные Каспийского моря со спутника MODIS-Aqua за период 2002-2021 гг. показали, что температура воды колебалась летом в пределах 24-30 °С, осенью от 12 °С до 18 °С, зимой от 0 °С до 10 °С, весной от 16 °С до 22 °С (рисунок 1.5) [23].

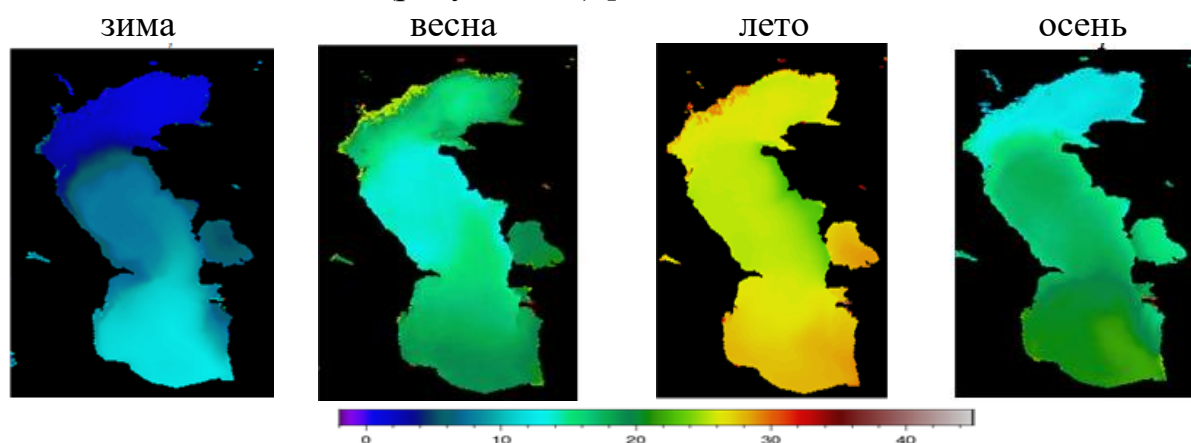


Рисунок 1.5 – Карты распределения средней температуры воды за период 2002-2021 гг. по данным спутника MODIS-Aqua [23]

Температура воды характеризуется увеличением с севера на юг и с запада на восток [24, 25].

Явление апвеллинга.

Согласно исследованиям, явление апвеллинга чаще проявляется у западного и восточного берегов Каспийского моря [26].

Для двух пунктов на восточном берегу Каспия (МГ Форт-Шевченко, МГ Актау) выявлено 179 случаев с апвеллингом с 1961 года по настоящее время. Данное явление в ряде случаев сопровождалось прохождением сгонно-нагонных явлений, так у МГ Форт-Шевченко 22 случая апвеллинга были при изменениях уровня моря более 10 см, а в МГ Актау при 19 случаях. Для примера, на рисунке 1.6 представлены гидрометеорологические характеристики при апвеллинге в период 3-6 сентября 2013 года у Форт-Шевченко [27].

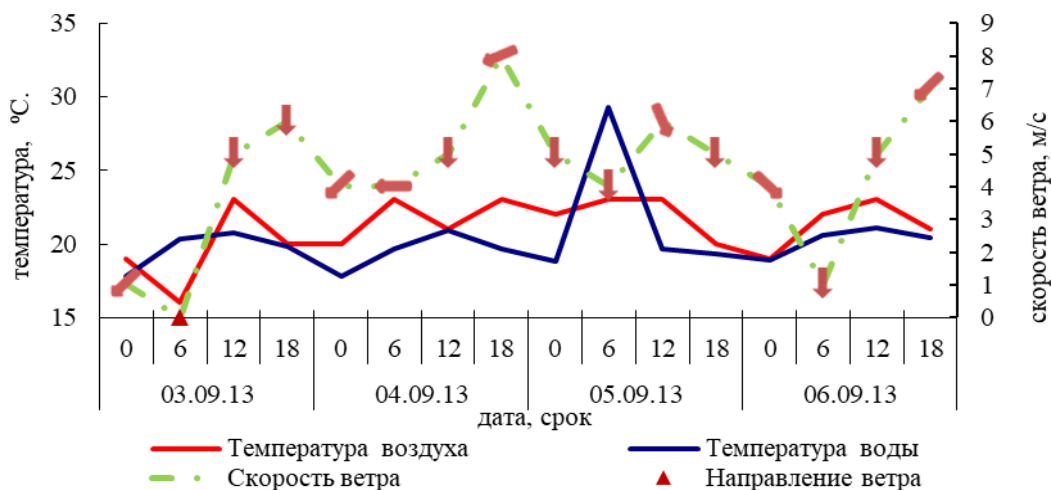


Рисунок 1.6 - Совмещённый график хода срочных значений температуры воздуха и воды, скорости и направления ветра по Форт-Шевченко в период 3–6 сентября 2013 г.

В районе МГ Актау максимальные колебания температуры воды были около 7 °С с 1980 по 1984 годы (рисунок 1.7). В 55 % (или 65 случаях) апвеллинга аномалии температуры воды не превышали 4 °С. Максимальное падение температуры воды было зарегистрировано 12–13 июня 1980 г., которое составило 7,6 °С.

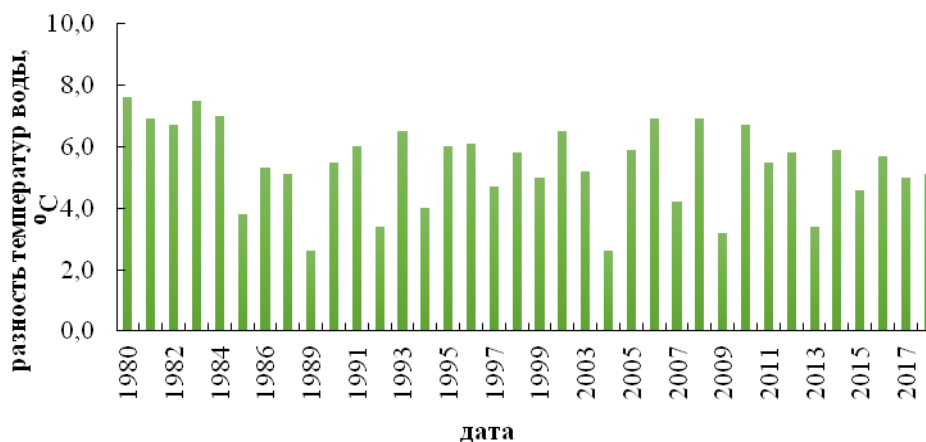


Рисунок 1.7 - Максимальное падение температур воды в результате явления апвеллинга в районе Актау

Апвеллинг вдоль срединной части восточного берега Каспийского моря имеет место в июне и июле. Максимальные падения температур в период наблюдений превышали 7 °С в 5 случаях: 2 – в июне, 3 – в июле.

В казахстанском секторе Каспия апвеллинг характеризуется сезонностью, при влиянии ветров западного, северо-западного, северо-восточного и юго-восточного направления.

У побережья апвеллинг может наблюдаться в течение всего года, с наибольшей частотой в июне-июле [27].

Соленость.

По данным наблюдательной сети в среднем многолетнем разрезе значения солености были от 9,97 ‰ (М Пешной) до 13,07 ‰ (МГ Актау). Наибольшая соленость наблюдается в Южном Каспий, минимальная в дельте рек Волга и Жайык [24, 25].

Данные Мирового океанического Атласа [28] показали, что морские воды у М Пешной (6,47 ‰) менее соленые, чем у МГ Актау (12,82 ‰), что связано с поступлением пресной воды с основных притоков моря, Волги и Жайыка [29]. Так анализ данных за период с 1955 года показал, что в северной части Каспийского моря значения солености были в пределах от 4,79 ‰ до 7,51 ‰, а в средней части моря от 12,32 ‰ до 13,08 ‰ [28, 29]. Максимальные значения наблюдались в апреле, а минимальные значения в январе и июне соответственно.

Ледовый режим.

Каспий относится к частично замерзающим морям, так его северо-восточная часть замерзает ежегодно, а в средней части лед появляется вдоль побережий лишь в суровые зимы [30]. В зависимости от особенностей атмосферных процессов, развивающихся над морем, степени аномалий термических условий в предзимье и зимой, над Каспием формируется своеобразная для каждого года ледовая обстановка.

Полное замерзание и образование припая обычно происходит севернее линии о. Чечень – о. Кулалы [31].

Зима на северо-востоке начинается в среднем 10 ноября — 1 декабря, у полуострова Мангышлак 10 ноября — 2 декабря и на побережье Среднего Каспия 10–20 декабря. Продолжительность холодного периода в северо-восточной части Северного Каспия достигает 5 месяцев, так как этот район расположен в зоне наибольшей континентальности климата, большая его часть в это время покрыта неподвижным льдом. На Среднем Каспии длительность холодного периода составляет 2,5–3 месяца, уменьшаясь в некоторых центральных районах и у восточного побережья до 1,5 месяцев [32, 33].

В средние по суровости зимы ледовый покров в Северном Каспии сохраняется 3–4 месяца. В аномально холодные зимы ледовый сезон увеличивается до 4–6 месяцев, в аномально теплые зимы ледовый покров на большей части акватории Северного Каспия сохраняется менее 2–3 месяцев. У побережья Среднего Каспия в умеренные зимы местный лед наблюдается

около месяца. В аномально холодные и ледовитые зимы он сохраняется 2–3 месяца и более [32, 35, 34, 31].

Анализ данных Единой системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [36, 37] показал что, начиная с зимы 2007-2008 года по 2021-2022 гг. самые первые ледовые явления на Каспийском море начинались в середине ноября (14.11.2018, 2020 г.), а очищение моря ото льда завершается в начале апреля (как, в 2021 году 6 апреля).

1.2 Краткая климатическая характеристика казахстанской части Каспийского моря

Климат казахстанского побережья Каспийского моря определяется географическим положением, условиями атмосферной циркуляции, характером подстилающей поверхности побережья и орографией берегов [1].

Для исследования климата использовались данные метеорологических станций (Атырау, Ганюшкино, Пешной, Кулалы, Форт-Шевченко, Кызан, Тущибек, Актау, Бейнеу, Сам) расположенных в прибрежных и близлежащих к Каспию районах Атырауской и Мангистауской областей по данным наблюдательной сети РГП «Казгидромет» [38], а также проанализированы [39] основные климатические характеристики, как средняя температура (среднее значение всех значений температуры, извлеченных из реанализа в каждой сетке за базовый период (1981-2010 гг.)), среднее годовое количество осадков (среднее значение всех значений интенсивности осадков, извлеченных из реанализа в каждой точке сетки за базовый период (1981-2010 гг.)) по данным реанализа ERA5. Данные реанализа были выбраны для 6 пунктов, расположенных на Каспийском море: Пешной (46.87 с.ш., 51.83 в.д.), Кулалы остров (44.9 с.ш., 50.04 в.д.), Форт-Шевченко (44.5 с.ш., 50.2 в.д.), Актау (43.6 с.ш., 51.19 в.д.), Песчаный (43.15 с.ш., 51.25 в.д.), Фетисово (42.79 с.ш., 52.51 в.д.).

Температура воздуха.

Во внутригодовом распределении температуры воздуха отчетливо видно, что минимальные температуры наблюдаются в холодный период года (январь) с постепенным повышением к летнему периоду (таблица 1.3). Максимальные значения средней температуры воздуха по данным всех рассматриваемых МС наблюдались в июле, значения изменяются от 24,8 °С (МС Актау) до 28,2 °С (МС Бейнеу).

Таблица 1.3 – Внутригодовой ход температуры воздуха, °С

Пункт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Атырау	-8,6	-7,9	-0,7	10,2	18,6	23,7	26,2	24,2	17,3	8,7	0,7	-5,2
Ганюшкино	-6,4	-5,8	0,7	10,5	18,3	23,4	25,4	23,7	17,1	9,1	1,8	-3,4
Пешной	-7,7	-7,4	-0,4	10,2	18,2	23,0	25,2	23,4	16,9	8,6	1,0	-4,5
Кулалы	-3,6	-3,6	1,7	10,7	18,3	23,6	26,2	25,2	19,3	11,6	4,5	-0,7
Форт-Шевченко	-2,3	-1,9	3,0	10,6	17,9	23,1	25,9	24,9	19,7	12,6	5,7	0,5
Кызан	-4,9	-4,2	2,8	12,4	20,1	25,4	27,9	26,4	19,4	10,8	3,1	-2,3
Тущибек	-3,5	-2,6	3,1	11,8	19,0	24,2	27,0	25,8	19,3	11,1	3,6	-1,3
Актау	-1,1	-0,2	4,9	11,5	17,7	22,4	24,8	24,5	19,7	12,7	6,0	1,2
Бейнеу	-6,9	-6,5	1,2	12,0	19,9	25,6	28,2	26,4	19,0	9,8	1,5	-4,1
Сам	-8,1	-7,4	0,4	11,4	19,4	25,0	27,7	25,7	18,2	9,0	1,0	-4,8

В годовом разрезе изменения температуры воздуха имеют тенденцию к росту по всем наблюдаемым метеорологическим станциям.

Согласно картам Национального Атласа РК [40] среднегодовая температура воздуха над Северным Каспием была 10,5 °С, а над средней частью моря 13 °С.

Также, согласно государственному климатическому кадастру за период 1991-2020 гг. норма средних годовых температур воздуха в Атырауской области составила 9,6 °С, а в Мангистауской области – 11,9 °С, а максимальные значения соответственно 15,3 °С и 17,4 °С [41].

По пунктам наблюдений нормы средних годовых температур воздуха составили: Атырау 10,4 °С, Ганюшкино 10,3 °С, Пешной 9,6 °С, Актау 12,7 °С, Бейнеу 11,3 °С, Кызан 12,1 °С, Опорная 10,8 °С, Сам 10,5 °С, Тущибек 11,9 °С, Форт-Шевченко 12,8 °С [41].

Норма максимальных температур воздуха составила: Атырау 15,6 °С, Пешной 14,3 °С, Ганюшкино 15,7 °С, Актау 17,7 °С, Бейнеу 17,0 °С, Кызан 18,0 °С, Опорная 16,6 °С, Сам 16,6 °С, Тущибек 17,3 °С, Форт-Шевченко 16,0 °С [41, 40].

По данным реанализа ERA5 за 1981-2010 гг. среднемесячная температура воздуха в Актау колебалась от -0,7 °С (январь) до 27,4 °С (июль), а среднегодовое значение составило 12,5 °С, в районе МС Пешной температура колебалась от -6,2 °С (февраль) до 27,3 °С (июль), среднегодовое значение составило 10,2 °С. В Форт-Шевченко среднемесячная температура изменялась от 3,3 °С (январь-февраль) до 25,9 °С (июль), в среднем за год 13,3 °С. В Кулалы среднемесячная температура изменяется от 0,6 °С (январь) до 26,6 °С (июль), со среднегодовым значением 12,3 °С. В Песчаном температура была от 4,0 °С (февраль) до 24,8 °С (август), среднее значение – 13,5 °С. В Фетисово температура воздуха колебалась от -2,0 °С (январь) до 29 °С (июль), а в среднем за год составила 12,9 °С (таблица 1.4).

Таблица 1.4 - Среднемесячные значения температуры воздуха по среднесуточным данным реанализа ERA5 [39]

Пункт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Пешной	-5,8	-6,2	0,3	10,7	18,5	24,8	27,3	25,3	18,3	10,0	2,0	-3,2
Кулалы	0,6	1,0	2,4	9,0	18,1	23,9	26,6	25,5	19,8	13,0	6,3	1,7
Форт-Шевченко	3,3	3,3	6,0	8,4	15,6	22,0	25,9	25,5	20,7	14,8	8,9	5,0
Актау	-0,7	-0,5	4,6	11,8	18,3	24,3	27,4	26,2	20,0	12,5	5,6	0,9
Песчаный	4,4	4,0	6,2	10,2	15,4	21,1	24,7	24,8	20,7	15,3	9,6	6,1
Фетисово	-2,0	-1,0	4,9	13,3	19,5	25,9	29	27,6	20,4	12,3	4,7	-0,3

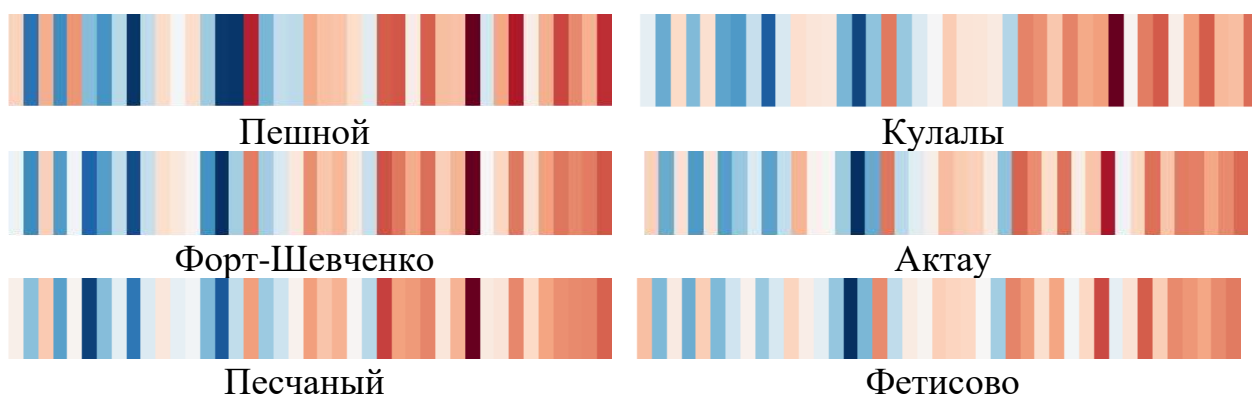
Аномалии температуры воздуха по данным ERA5 в Актау менялись от 1,6°С (1993 г.) до -2°С (2010 г.), в Пешном от -1,8°С (1987, 1993, 1994 гг.) до 1,9°С (2010 г.), в Форт-Шевченко -1,5°С (1993 г.) и 1,5°С (2010 г.), в Песчаном от -1,5°С (1984 г.) до 1,6°С (2010 г.), в Кулалах от -1,5°С (1993 г.) до 1,6°С (2010 г.), Фетисово от -2,3°С (1993 г.) до 1,5°С (2010 г.) (рисунок 1.8).

В 2022 году февраль для всей территории Западного Казахстана был теплым, так максимальная температура воздуха составила для МС Форт-Шевченко 25 февраля +17,6°C, для МС Атырау 26 февраля +14,4°C [42].

Атмосферные осадки.

Внутригодовой ход атмосферных осадков по наземным данным показал, что наибольшие значения средних осадков наблюдались в теплый период года, с марта по июнь, и в холодный период года – с октября по декабрь (таблица 1.5).

В годовом разрезе по рассматриваемым МС наблюдаются незначительные тенденции как к повышению (Форт-Шевченко, Сам, Актау, Пешной), так и к понижению (Кулалы остров, Тущибек, Кызан, Бейнеу, Ганюшкино, Атырау) годовой суммы атмосферных осадков.



Примечание: цвет каждой полосы представляет аномалию температуры для данного года или насколько теплее (красный) или холоднее (синий) этот год был по сравнению с долгосрочным базовым периодом 1981-2010 гг.

Рисунок 1.8 - Полосы потепления за период 1979-2019 гг. по данным ERA5 [39]

Таблица 1.5 – Внутригодовой ход атмосферных осадков, мм

Пункт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Атырау	14,9	12,5	14,4	15,3	19,4	18,9	15,7	13,0	11,9	15,0	15,6	17,4
Ганюшкино	10,8	8,5	13,2	13,6	17,8	17,9	16,6	12,1	14,0	15,4	12,2	12,3
Пешной	12,0	9,4	11,9	13,2	17,0	11,0	11,7	9,3	10,3	15,1	14,6	12,6
Кулалы	7,4	6,4	11,6	14,5	15,5	8,8	8,4	9,3	10,8	9,0	14,1	10,0
Форт-Шевченко	8,0	7,2	10,5	15,2	14,0	12,8	12,7	11,4	14,0	12,0	10,8	10,5
Кызан	10,5	9,6	16,7	19,1	18,6	19,8	15,3	7,9	9,8	12,6	15,1	12,3
Тущибек	12,0	10,9	18,4	21,0	24,2	16,0	14,4	7,0	9,8	12,5	17,7	14,4
Актау	14,3	12,9	17,1	18,0	13,3	10,5	8,2	7,6	9,1	14,3	19,3	20,6
Бейнеу	9,9	9,6	13,1	17,6	16,5	13,9	13,4	4,4	7,5	13,3	12,6	11,7
Сам	13,0	11,6	16,4	17,2	16,6	15,6	11,7	6,6	8,4	12,4	14,1	14,2

Согласно государственному климатическому кадастру за период 1991-2020 гг. норма годового количества атмосферных осадков в Атырауской области составила 130 мм, а в Мангистауской области 85 мм [41].

По пунктам наблюдений норма годового количества атмосферных осадков в Атырау 110 мм, в Ганюшкино 103 мм, в Пешном 93 мм, Актау 81 мм, Бейнеу 72 мм, Кызан 97 мм, Опорная 76 мм, Сам 94 мм, Тущибек 106 мм, Форт-Шевченко 76 мм [41].

Средние значения сумм осадков за 1981-2010 гг. по данным ERA5 составили: 207 мм в Актау, 219 мм в Пешном, 288 мм в Форт-Шевченко, в 257 мм Кулалы, 244 мм в Песчаном, 166 мм в Фетисово (таблица 1.6). Наибольшее количество осадков в северной части моря выпадет в апреле, а в восточной части моря максимальное количество осадков за данный период выпадало в феврале (Форт-Шевченко), в апреле (Актау, Фетисово), в ноябре (Песчаный).

Изменение климата.

Современное изменение климата в казахстанской части Каспийского моря характеризуется увеличением температур воздуха и отсутствием существенных изменений в количестве осадков [43, 44, 45, 46].

По данным всех рассматриваемых метеостанций в период 1976-2020 гг. наблюдается устойчивое повышение средней годовой температуры (таблица 1.7). В среднем в Северной части Каспийского моря повышение средней годовой температуры воздуха составляет 0,44 °С каждые 10 лет.

Таблица 1.6 - Среднемесячное количество осадков по данным реанализа ERA5, мм [39]

Пункт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Пешной	19,8	19,8	19,5	24,4	23,9	16,7	14,1	7,5	12,0	19,1	22	19,8
Кулалы	22,9	22,1	19,1	26,4	27,3	21,3	21,1	12,9	16,5	19,9	26,2	21,4
Форт-Шевченко	28,2	31,8	24,2	23,7	19,2	17,2	16,7	13,2	21,6	25,2	34,5	31,9
Актау	16,7	18,2	16,6	22,0	20,0	20,4	14,2	12,8	13,2	16,6	19,3	16,8
Песчаный	32,6	27,8	22,0	18,9	16,1	11,1	7,5	5,4	15,0	21,8	32,7	32,9

В Средней части Каспийского моря повышение средней годовой температуры составило 0,47 °С каждые 10 лет. В весенний и летний сезоны повышения температуры воздуха статистически значимое. Осенью на всех МС кроме Пешного и Сама, отмечается значимое повышение температуры.

Таблица 1.7 - Характеристики линейного тренда температуры воздуха за период 1976-2020 гг.

МС	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	a	R ²	a	R ²	a	R ²	a	R ²	a	R ²
Атырау	0,53	54,51	0,46	11,43	0,47	28,95	0,9	59,56	0,34	11,19
Ганюшкино	0,40	32,55	0,43	6,8	0,43	17,74	0,44	29,74	0,33	10,85
Пешной	0,38	26,9	0,47	6,77	0,51	19,83	0,31	22,59	0,26	5,68
Кулалы	0,39	23,2	0,37	3,43	0,4	9,46	0,43	28,9	0,39	8,29
Форт-Шевченко	0,45	42,22	0,29	5,39	0,46	23,49	0,63	46,51	0,5	21,33
Кызан	0,51	48,18	0,46	7,04	0,58	26,46	0,5	31,64	0,4	13,01
Тушибек	0,39	37,77	0,32	6,38	0,4	14,83	0,46	25,63	0,34	9,49
Актау	0,53	54,51	0,46	11,43	0,47	28,95	0,9	59,56	0,34	11,19
Бейнеу	0,58	53,05	0,32	2,63	0,87	39,07	0,62	39,03	0,43	13,58
Сам	0,37	24,86	0,15	0,48	0,74	25,54	0,45	25,81	0,27	5,65

Примечание: жирным шрифтом выделены значимые изменения температуры воздуха.

Более быстрыми темпами теплеет в районе средней части Каспийского моря. Анализ тенденции изменения количества осадков за период 1976-2020 гг. показал уменьшение количества осадков, однако, значимые изменения наблюдались только в районе МС Кулалы (таблица 1.8).

Таблица 1.8 - Характеристики линейного тренда суммы атмосферных осадков за период 1976-2020 гг.

МС	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	а	R ²	а	R ²	а	R ²	а	R ²	а	R ²
Атырау	12,22	10,31	5,05	13,08	9,47	14,67	-0,71	0,17	-1,08	0,47
Ганюшкино	-6,3	2,36	-0,48	0,34	3,45	4,14	-6,01	5,17	-2,99	3,79
Пешной	9,94	6,11	2,61	2,93	9,2	15,41	0,05	0	-1,53	1,07
Кулалы	-33,56	39,67	-2,59	7,98	-14,89	31,7	-6,64	16,85	-9,17	23,53
Форт-Шевченко	-6,29	3,25	2,6	6,66	-4,42	4,57	-0,94	0,26	-3,14	4,56
Кызан	-6,84	3,74	1,33	1,79	-3,24	2,02	-1,06	0,29	-3,4	5,32
Тущибек	-0,73	0,02	4,77	12,61	-6,14	3,37	2,37	1,85	-1,11	0,72
Актау	-1,12	0,07	3,01	3,08	-5,71	4,53	2,58	2,7	-0,31	0,03
Бейнеу	-6,4	3,19	2,4	5,95	-2,43	2,12	-1,57	0,55	-4,64	10,96
Сам	9,74	6,45	6,07	22,22	2,22	1,11	3,13	2,8	-0,96	0,41

Примечание: жирным шрифтом выделены значимые изменения атмосферных осадков.

Выводы по 1 главе:

Каспийское море как самый крупный замкнутый водоем мира, подвержен как внутригодовым, так и многолетним изменениям гидрометеорологических параметров.

1. Под влиянием климатических и антропогенных факторов Каспийскому морю характерны циклические колебания уровня моря. За период систематических наблюдений он изменялся от минус 25,74 м БС (1900 г.) до минус 29,01 м БС (1977 г.).

Под влиянием барических градиентов и связанных с ними ветров прибрежная акватория Каспийского моря подвержена образованию сгонно-нагонных явлений. Наиболее чаще на море образуются критические (до 50 см) коротко периодичные колебания уровня. В последние 10 лет наблюдается увеличение их количества, из общего количества за рассматриваемый период наблюдалось 48% нагонных явлений и 51% сгонных явлений. Преобладающим периодом наблюдения сгонно-нагонных явлений является весна и осень.

2. Температура воды характеризуется увеличением с севера на юг и с запада на восток. Низкие температуры воды в Северной части моря связаны с влиянием стока рек Волга и Жайык. Во внутригодовом распределении температуры воды прослеживается одинаковый ход по всем станциям и постам, максимум наблюдается летом (июль-август), а минимум отмечается в холодный период года (январь-февраль).

3. Акватория Каспийского моря подвержена влиянию апвеллинга, который чаще проявляется у западного и восточного берегов Каспийского моря. В казахстанском секторе Каспия апвеллинг характеризуется сезонностью, при влиянии ветров западного, северо-западного, северо-восточного и юго-восточного направления. У побережья апвеллинг может наблюдаться в течение года, с наибольшей частотой в июне-июле.

4. Изменения солености в казахстанской части моря были от 9,97 ‰ до 13,07 ‰. Наибольшая соленость наблюдается в Южном Каспии, минимальная в дельте рек Волга и Жайык, что подтверждается данными Мирового океанического Атласа.

5. В годовом разрезе изменения температуры воздуха имеют тенденцию к росту. Норма средних годовых температур воздуха за 1991–2020 гг. в Атырауской области составила 9,6 °С, в Мангистауской области 11,9 °С, а максимальные значения соответственно 15,3 °С и 17,4 °С.

Минимальные температуры наблюдаются в холодный период года (январь) с постепенным повышением к летнему периоду. Максимальные значения, наблюдавшиеся в казахстанской части моря, наблюдались в июле от 24,8 °С (МС Актау) до 28,2 °С (МС Бейнеу).

Аномалии температуры воздуха по данным реанализа ERA5 в регионе составили от -2,3°С до 1,6°С.

6. Тенденция изменения годовой суммы атмосферных осадков в годовом разрезе подвержена, как повышению (Форт-Шевченко, Сам, Актау, Пешной), так и к понижению (Кулалы остров, Тушибек, Кызан, Бейнеу, Ганюшкино, Атырау).

Внутригодовой ход атмосферных осадков по наземным данным показал, что наибольшие значения средних осадков наблюдались в теплый период года, с марта по июнь, и в холодный период года – с октября по декабрь.

Согласно государственному климатическому кадастру за период 1991-2020 гг. норма годового количества атмосферных осадков в Атырауской области составил 130 мм, а в Мангистауской области 85 мм.

7. Влияние изменения климата в современный период характеризуется увеличением температур воздуха и отсутствием существенных изменений в количестве атмосферных осадков.

Повышение средней годовой температуры воздуха составляет 0,44 °С каждые 10 лет в Северном Каспии и 0,47 °С каждые 10 лет в Среднем Каспии. Быстрыми темпами теплеет в районе средней части Каспийского моря. Весной и летом повышения температуры воздуха статистически значимы.

Анализ тенденции изменения количества осадков за период 1976-2020 гг. показал уменьшение количества осадков.

2 ИЗУЧЕННОСТЬ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА КАСПИЙСКОМ МОРЕ

2.1 Наблюдения за волнением

Регулярные наблюдения за волнением на Каспийском море впервые были начаты в 1916 году на организованных прибрежных и островных гидрометеорологических станциях, где определялось состояние поверхности моря по 9-балльной шкале.

В 1922 году Управлением по безопасности кораблеводства на Каспийском море была создана Бакинская морская обсерватория, на базе которой были начаты работы по морской метеорологии, климатологии моря, гидрологии и магнетизму [47].

С 1924 года четыре раза в год (февраль, май, август, ноябрь), в соответствии с рекомендациями, созданного в 1902 г. Международного совета по изучению морей, на Южном Каспии стали проводиться гидрологические работы по маршруту Баку-Красноводск-Ашураде-Астара-Баку.

Первые наблюдения за волнением в открытом море в Среднем и Южном Каспии были проведены экспедицией Убекокаспа в 1924 г., а затем продолжены в 1926–1927 гг. [48].

Осенью 1933 г. сотрудниками ГГИ были организованы комплексные исследования волнения в открытом море [49]. Измерения волн производились с теплохода «Коминтерн», совершавшего рейсы Баку-Астраханский рейд.

К 1940 г. количество пунктов наблюдения за волнением достигло 32. Проводились наблюдения за состоянием поверхности моря, направлением и типом волнения, высотой и периодом волн. Начиная с 1947 г. на станциях Махачкала, Дербент и остров Артема, а с 1948–1949 гг. и в остальных стали проводится полуинструментальные наблюдения по волномеру Богдановича-Шулейкина. С 1949 г. на некоторых станциях были установлены волномеры-перспектометры Р. Н. Иванова, которыми вскоре были оснащены все станции.

Открытие морских месторождений нефти и газа, начало их разработки потребовали специализированного изучения гидрометеорологического режима моря и в первую очередь – волнения. В связи с этим ГОИН совместно с «Азнефти» с 1950 г. приступил к широко промышленным исследованиям с основной задачей изучения режима волнения на нефтеносных акваториях моря и выдачи информации о возможных элементах волн, необходимой для проектирования и эксплуатации нефтегазодобывающих гидротехнических сооружений.

В 1950 г. были начаты наблюдения на волномерных постах Нефтяные Камни, Камни Григоренко, банка Дарвина, южная эстакада о. Артема, о. Булла, о. Свиной, Изберг, Каягент, Буйнак. Волнение наблюдали по

волномеру-перспектометру Иванова и волномерной рейке, скорость и направление ветра по анемометру и флюгеру.

Вскоре на волномерной станции Изберг впервые применили прибрежный волнограф ГОИНа, разработанный Я.Г. Виленским и Б.Х. Глуховским. Также начаты исследования по определению давления волны на сваю с помощью динамометрической консоли. Помимо наблюдений на волномерных постах, осуществлялись судовые наблюдения за волнением в открытом море, проводились комплексные гидрометеорологические наблюдения в 30-мильной прибрежной зоне, а также на разрезе вдоль Апшеронского порога. В районе Нефтяных Камней проводилась площадная съемка волнения. Во многих точках этой акватории были установлены максимальные рейки, которые автоматически регистрировали максимальные высоты волн за определенный период времени.

В 1952 г. волномерные посты экспедиции были переданы в ведение УГМС Азербайджанской ССР и на их базе организованы постоянно действующие станции.

В 1954 г. введена более совершенная методика прибрежных наблюдений за волнением, которые в дальнейшем служили основным исходным материалом для изучения режима волнения в прибрежных районах Каспия.

В 1953–1955 гг. в Апшеронском районе, в частности, на Нефтяных Камнях ГОИН провел большие экспериментальные исследования. Большое внимание было уделено исследованию функций распределения элементов волн, как на глубоководных акваториях, так и в прибрежной зоне [50]. Работы, выполненные Каспийской экспедицией ГОИНа, дали существенный толчок дальнейшему развитию исследований волнения на Каспийском море, способствовали созданию теоретических и эмпирических методов расчета элементов волн [51]. Они послужили основой для изданного в 1960 г. первого в СССР «Руководства по расчету морских волн и ветра над морем» [52]. После окончания работ в 1955 г. экспедиция ГОИНа в Нефтяных Камнях была реорганизована в специализированную гидрометеостанцию (СГМС).

В 1958 г. для изучения волнового режима в новых, перспективных для добычи нефти и газа районах моря на базе СГМС Нефтяные Камни и других станциях была организована Каспийская океанографическая экспедиция УГМС Азербайджанской ССР. Исследования волнения и течений проводились путем организации мобильных постов на эстакадах и отдельных свайных платформах, для большего охвата акваторий моря. При наблюдениях за волнением использовались дистанционные струнные волнографы, волномерные вехи и волномеры-перспектометры Иванова. С октября 1958 г. по ноябрь 1961 г. в составе экспедиции работали 7 волнографных постов. За время работы экспедиции собраны материалы наблюдений за волнением, течениями, на акватории Апшеронского и

Бакинского архипелагов, который позволил выявить особенности режима волнения в этих районах.

Начало экспериментальным исследованиям волнения в Северном Каспии было положено в 1963 г. с момента изготовления первого опытного образца автономной гидрометеостанции на передвижном свайном основании (АПС-1).

В 1964 г. в центральной части Северного Каспия Астраханская гидрометеообсерватория совместно с ГОИНОм провела испытания АПС, и с этого же года началась ее регулярная эксплуатация для стационарных и специальных экспедиционных исследований в заданных пунктах моря. В течение 1964–1965 гг. АПС устанавливалась в разных пунктах Северного Каспия на удалении от берега до 50 миль. В 1964 году работы Каспийской океанографической экспедиции велись в акватории, расположенной в юго-западной части моря, в районе Бакинского архипелага, о.Жилого, вблизи восточного побережья моря у полуострова Челекен и в других местах.

Волнографные наблюдения анализировались с целью изучения развития ветровых волн на мелководье, функций распределения высот и периодов волн для подобных условий и уточнения методов расчета элементов волн мелководной части моря. Около 100 волнографных записей, полученных в Северном Каспии, использованы для определения зависимости элементов волн мелководного бассейна от скорости ветра и глубины моря для составления «Атласа ветра и волн Северного Каспия» [53].

В 1964–1968 гг. программа экспедиции предусматривала экспериментальные исследования развития волнения в условиях глубокого и мелкого моря, а также трансформации волн в прибрежной зоне и затухания давления волн с глубиной; проверку оправдываемости различных методов расчета элементов волн для районов строительства и эксплуатации различных ГТС.

На Нефтяных Камнях проводились первые испытания радиоволнографа ГМ-32, радиоизмерителя течений ГМ-33, волнографов ГМ-31 и ГМ-62.

Экспедицией Московского энергетического института в течение трех лет (1968–1971 гг.) изучалась отражающая способность взволнованной поверхности моря и возможность определения элементов волн методами радиолокации [54]. В 1974–1975 гг. оценкой неконтактных методов определения элементов волн занимался ГОИН. На Нефтяных камнях были проведены комплексные исследования с применением радиолокации, лазерной техники, эхолота и сравнивались с данными обычных волнографов [55].

В 1974 году экспедиция ГОИНа вблизи СГМС Нефтяные Камни провела оценку неконтактных методов определения элементов волн посредством установки 14 проволочных волнографов. В 1975 году аналогичная работа проведена экспедиционной группой СГМС Нефтяные Камни. В декабре 1975 года на ней впервые удалось записать резонансные

волны зыби, возникновение которых связывают с флуктуациями атмосферного давления в момент прохождения над морем холодного фронта.

В 1986 году под научно-методическим руководством ГОИНа подготовлен и издан научно-прикладной справочник «Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР», том 2 «Каспийское море» [1], а в 1992–1996 гг. в рамках проекта «Моря» подготовлены и изданы научные монографии «Гидрометеорология и гидрохимия морей, том 6 «Каспийское море», Выпуск 1 «Гидрометеорологические условия» (1992 г.), Выпуск 2 «Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биопродуктивности» (1996 г.) [2].

В 1987 году разработаны нормы проектирования «Параметры ветровых волн, воздействующих на откосы транспортных сооружений на реках» [56], предназначенные для определения параметров ветровых волн.

В 1994 году Гидрометеорологические организации прикаспийских государств при поддержке Всемирной метеорологической организации создали Координационный комитет по гидрометеорологии и мониторингу загрязнения Каспийского моря (КАСПКОМ) [57].

В 1995 году опубликована подготовленная совместно МГУ им. М. Ломоносова и ГОИНа в рамках проекта «Моря» монография «Климатические термохалинные поля Каспийского моря», в основу которой положены данные 65 тысяч судовых наблюдений за период начиная с 1925 года.

В 2003 году вышел в свет, подготовленный ГОИНОм совместно с ГГИ сборник научных трудов «Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна» [58].

В 2005-2007 гг. вышли в свет ряд научных монографии о состоянии Каспийского моря: «Современное состояние Каспийского моря» подготовленная Институтом водных проблем РАН, «Спутниковая альтиметрия Каспийского моря» подготовленная Институтом океанологии РАН, «The Caspian Sea Environment» подготовленная коллективом авторов из МГУ, ГОИН, ИО РАН, «Каспийское море: экстремальные гидрологические события» выпущенный Институтом водных проблем РАН, «Гидрометеорологическая изменчивость и экогеографические проблемы Каспийского моря» подготовленный Институтом географии Национальной академии наук Азербайджана.

В 2008-2012 гг. в рамках Единой системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) созданы электронные информационные ресурсы: электронное справочное пособие по Каспийскому морю (разработанное ГОИНОм); электронный атлас «Климат морей России и Мирового океана», включая раздел, посвященный Каспийскому морю (разработанный ВНИИГМИ); оперативный модуль ЕСИМО, содержащий ежедневно обновляемую фактическую и прогностическую информацию по

гидрометеорологическим условиям Каспийского моря (разработанный Гидрометцентром России).

В 2012 году ГОИНОм создана электронная база данных «Гидрохимическое состояние и загрязнение морей РФ», в которой содержится информация о состоянии сети наблюдений на Каспийском море и данные государственного мониторинга.

В настоящее время прикаспийскими странами проводятся исследования волновых процессов на Каспийском море, в том числе выпуск прогнозов характеристик волнения. Так, в рамках ЕСИМО представляются прогностические карты параметров ветрового волнения (высота преобладающих волн, высота волн зыби, высота ветровых волн, средняя длина волны, средний период волн) на основе расчетов спектральной модели Wavewatch III v. 3.14 на основе данных NCEP/NOAA и Гидрометцентра России [59]. Турецкая государственная метеорологическая служба также выпускает прогнозы волнения с использованием модели, разработанной совместно с Middle East Technical University на срок до 72 часов с дискретностью 3 часа [60].

2.2 Научные исследования

Изучением волновых процессов на Каспийском море занимаются ряд зарубежных авторов, в особенности ученые прикаспийских стран. Следует отметить труды Абузьярова З.К. [61, 62, 63], Нестерова Е.С. [64], Лопатухина Л.И. [65], Мысленкова С.А. [66], Архипкина В.С. [67], Лебедева С.А. [68], Костяного А.Г. [69].

Добровольским А.Д. и Залогом Б.С. проведены исследования различных природных, в том числе гидрометеорологических характеристик, так определено что периоды высокого волнения более 6 баллов отмечаются в период с ноября по март [70].

Согласно исследованиям Лебедева С.А., Костяного А.Г., Гинзбурга А.И. современные методы численного моделирования, их развитие, увеличение количества данных ДЗЗ позволяют достаточно точно анализировать динамические процессы происходящие на Каспийском море [71], в том числе волновые процессы.

Идентификацию основных особенностей волнового климата Каспийского моря по данным реанализа NCEP/NCAR, его ретроспективный анализ выполняли Лопатухин Л.И., Яйцкая Н.А. [72, 73, 74], Мысленков С.А. [75].

Разработанная в Гидрометцентре России автоматизированная система прогнозирования ветрового волнения для Каспийского, Черного и Азовского морей в основе которой применяется программный код спектральной модели WaveWatch III показала достаточно высокое качество прогнозов, сопоставимые с другими зарубежными системами [76, 77].

Исследования ветрового и волнового потенциала Южного Каспия проводились исследователями из Ирана, расчет волновой энергии с

применением модели SWAN [78], прогнозы ветрового волнения с применением численных методов и экспериментальных расчетов [79], получены выводы что применение нейронных сетей NARX для прогноза прибрежной высоты волны показывают достаточно высокую связь с наблюдаемыми данными [80]. Также [81] получены результаты о применимости результатов моделирования MIKE 21 SW для расчета ветрового волнения, так как сравнение с наблюдаемыми данными в пунктах Анзали и Амирабад показали достаточно высокую корреляционную связь. Результаты исследования применимости 1D моделирование волнения с применением модели SWASH показало удовлетворительную связь с наблюдаемыми данными [82].

Bruneau N., Toumi R [83] были проведены расчеты волнения с применением сопряженной системы океан-атмосфера-волны с использованием WRF, ROMS, SWAN. Результаты которых показали, что на Каспийском море наблюдаются многорежимные волновые состояния. Так на севере распространены слабые волны высотой менее 50 см направленные на восток и запад. Rusu E., Onea F. [84] смоделированы характеристики волнения с применением ветра реанализа ERA-Interim за 2005–2010 гг., результат которой показал что максимальные высоты волн формируются в Средней части моря, так в прилегающей к Казахстану акватории максимальная высота волны достигала 2,84 м.

Проведенные Мысленковым С.А. [85] расчеты волновой энергии показали, что потенциал Каспия по сравнению с другими морями небольшой. В работе [66] была проведена адаптация модели SWAN с использованием ветра реанализа NCEP/CFSR, полученные результаты показали, что моделирование волнения на неструктурированной сетке дает возможность получать характеристики волнового режима в небольших бухтах, заливах и т.д.

Адаптацию численных моделей прогнозирования характеристик ветрового волнения в Казахстане проводили Ивкина Н.И., Галаева А.В. [86].

О применимости данных спутников альтиметров писал ряд авторов [87], в том числе нужно отметить результаты казахстанских авторов Ракишевой З.Б., Кудрявцевой Н., Кусембаевой К.К., Сахаевой А.К. [88, 89].

Повышение точности альтиметрических измерений и разработка новых методов их обработки приводят к возможности использования данных ДЗЗ не только на акватории океанов, но и во внутренних водоемах [68, 90, 91, 69].

По карте районирования средней высоты волны за период 1993-2012 гг. по всей акватории Каспийского моря, разработанной Лебедевым С.А. [68] по данным спутников альтиметров установлено, что западное побережье Среднего Каспия и юго-восточная часть Южного Каспия подвержена влиянию наибольших высот при ветровом волнении. Также отмечено, что в Среднем Каспии ветровое волнение с высотой более 2 м наблюдается в январе и октябре [91, 69, 92, 93].

В 2014 году Маммадовом Р.М. разработан «Гидрометеорологический Атлас Каспийского моря» [94], в 2015 г. Русским Географическим Обществом Географического факультета МГУ имени М. Ломоносова разработан «Электронный атлас Каспийского моря», включающий океанографические исследования, как температура воды, соленость, ледовые условия, волновой климат. Так согласно Атласу, в Каспийском море существуют несколько районов, где в течение всего года формируются наиболее высокие волны: возле Апшеронского полуострова и центральной части Южного Каспия, а также восточной части Среднего Каспия [3].

За период 1979–2020 гг. рассчитанные значения максимальных высот волн по результатам исследований Мысленкова С.А. [67] для северо-восточной части Каспийского моря доходили до 2 м.

Выводы по главе 2:

1. Начатые в 1916 году регулярные наблюдения за волнением продолжаются, проводятся различные экспериментальные исследования по определению волновых характеристик на море. В настоящее время всеми прикаспийскими странами выпускаются прогнозы волнения на акватории моря с применением различных численных моделей. Научные исследования волновых характеристик, применение данных ДЗЗ, составление прогнозов их изменения является актуальной задачей для ученых.

2. Картографирование Каспийского моря проводилось различными авторами, составлены несколько атласов как, «Атлас ветра и волн Северного Каспия» (под ред. Е.М. Копайгородского, 1964), «Атлас волнения и ветра Среднего и Южного Каспия» (под ред. Л.П. Тамбовцева, 1968), «Комплексные гидрометеорологические атласы Каспийского и Аральского морей» (под ред. В.С. Самойленко, А.И. Сачкова, 1963). В современный период МГУ имени М. Ломоносова разработан «Электронный атлас Каспийского моря», Маммадовым Р.М. составлен «Гидрометеорологический атлас Каспийского моря», в который входят также изменения высоты волны различной обеспеченности по акватории моря.

3 ВЕТРОВЫЕ УСЛОВИЯ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ВОЛНЕНИЕ НА КАСПИЙСКОМ МОРЕ

Работы по освоению природных ресурсов шельфа моря, и связанные с ними проекты создания морских портов, гидротехнических сооружений, причалов и т. д. требуют сведений о ветровом и волновом режиме для объективного обоснования надежности конструкции. В связи с этим, особый интерес представляют особенности характеристик ветра: режим скоростей и направления.

Большинство явлений и процессов, происходящих во внутренних водоемах, обуславливаются и протекают под непосредственным воздействием атмосферы [95], так под воздействием ветра на поверхности воды формируются волновые явления разных масштабов и происходят процессы переноса и перемешивания вод.

Как показал анализ, средние скорости ветра над Каспийском морем распределяются следующим образом: в теплый период года они меньше, и усиливаются в холодный период [96, 97, 98]. Однако, в последние годы заметны значимые изменения скоростей ветра [74, 99, 100].

Исследование ветрового режима в казахстанской части Каспийского моря проводилось по наблюдаемым данным морских станций и постов: М Пешной, МГ Кулалы остров, МГ Форт-Шевченко, МГ Актау, МГП Песчаный, МГП Курык, МГП Фетисово и по литературным источникам. Также были проанализированы ветровые характеристики по данным дистанционного зондирования Земли и выявлены незначительные отклонения от наблюдаемых данных на станциях и постах [101, 102, 103].

3.1 Анализ скорости ветра по данным наблюдений

Скорости ветра для акватории Каспийского моря были проанализированы за многолетний период с года начала наблюдений на станциях и постах, представленных в таблице 3.1.

В казахстанской части Каспийского моря по данным морской наблюдательной сети среднегодовые скорости ветра колеблются от 4 м/с в районе МГ Актау до 5 м/с у МГ Кулалы остров (таблица 3.1), а максимальные значения от 20 м/с (МГП Фетисово) до 28 м/с (М Пешной, МГ Кулалы остров, МГ Форт-Шевченко) [104-106].

Таблица 3.1 – Характеристики скорости ветра по станциям

Пункт наблюдения	Период наблюдений	Среднегодовая скорость ветра, м/с	Максимальная скорость ветра, м/с
М Пешной	1944–2021	4,2	28 (1946, 1950, 1951, 1953, 1959)
МГ Кулалы, остров	1980–2021	5,0	28 (2000)
МГ Форт-Шевченко	1993–2021	4,7	28 (2002)
МГ Актау	1961–2021	4,0	24 (1961, 1978)
МГП Песчаный (Исан)	2009–2021	4,6	27 (2010)
МГП Курык	2009–2021	4,5	22 (2013)
МГП Фетисово	2010–2021	4,6	20 (2015)

Сравнение с данными из научно-прикладного справочника по климату [107, 108] за разные периоды исследования позволило выявить, что существует тенденция уменьшения скорости ветра в последние годы. Например, по данным МГ Форт-Шевченко, средняя скорость ветра за период 1922-1950 гг. составляла 7,2 м/с, в 1938-1980 гг. – 6,3 м/с, за 1966-2000 гг. – 6,0 м/с, а за 1993-2021 гг. – 4,6 м/с (рис. 3.1 а); у МГ Актау (рис. 3.1 б), средние многолетние скорости ветра с 2000 года по настоящее время уменьшились с 5 м/с до 4,2 м/с по сравнению с периодом 1961-1989 гг.

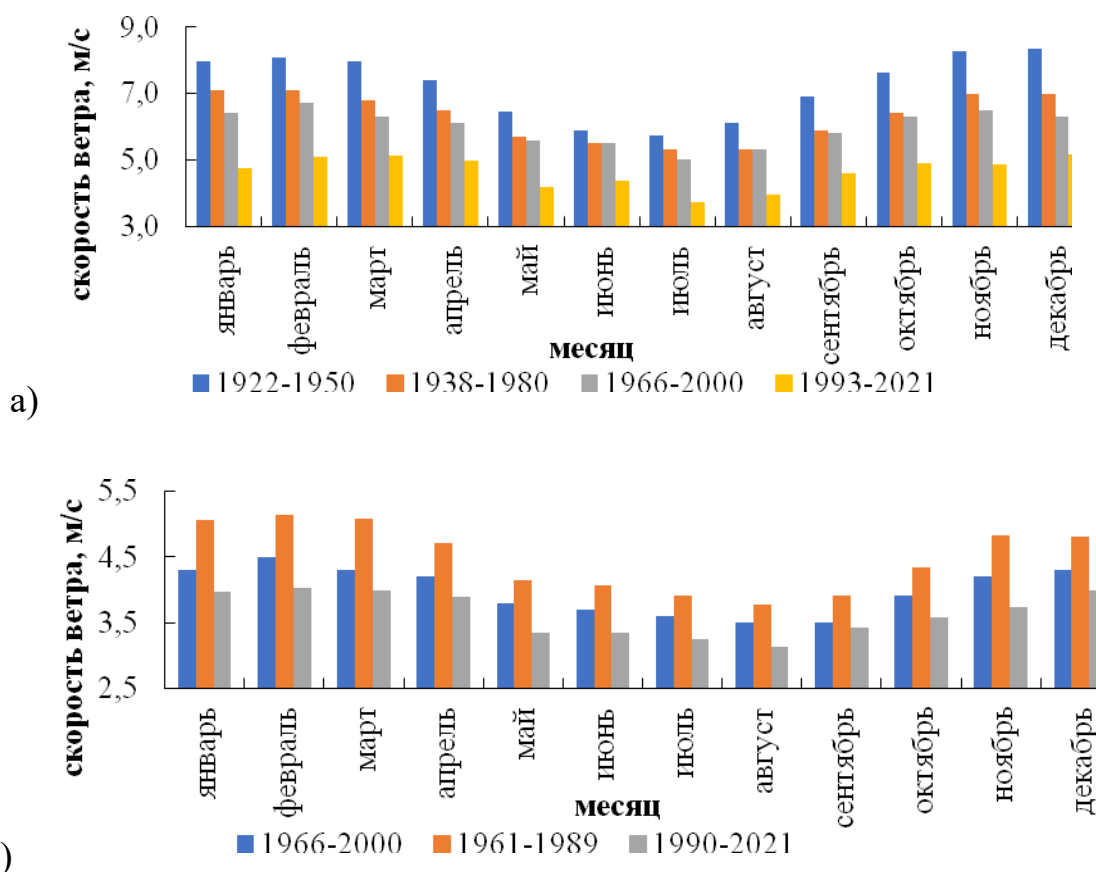


Рисунок 3.1 – Гистограмма внутригодового хода скорости ветра за различные периоды в районе а) МГ Форт-Шевченко; б) МГ Актау

Распределение многолетних средних месячных скоростей ветра в течение года по станциям и постам приведено на рисунке 3.2.

На севере акватории Каспийского моря (М Пешной и МГ Кулалы остров) минимальные скорости ветра составляют 3,4 м/с (июль-август) и 4,3 м/с (июль), а максимальные – 4,9 м/с (февраль) и 5,6 м/с (апрель) соответственно. По направлению к югу, в сторону моря, скорость ветра возрастает, так у МГП Курык и МГП Песчаный минимальное среднее месячное значение скорости ветра 3,8 м/с (август), когда у МГ Актау и МГ Форт-Шевченко данное значение ниже, соответственно 3,4 м/с (август) и 3,6 м/с (июль), у МГП Фетисово минимальное значение 4,0 м/с (август).

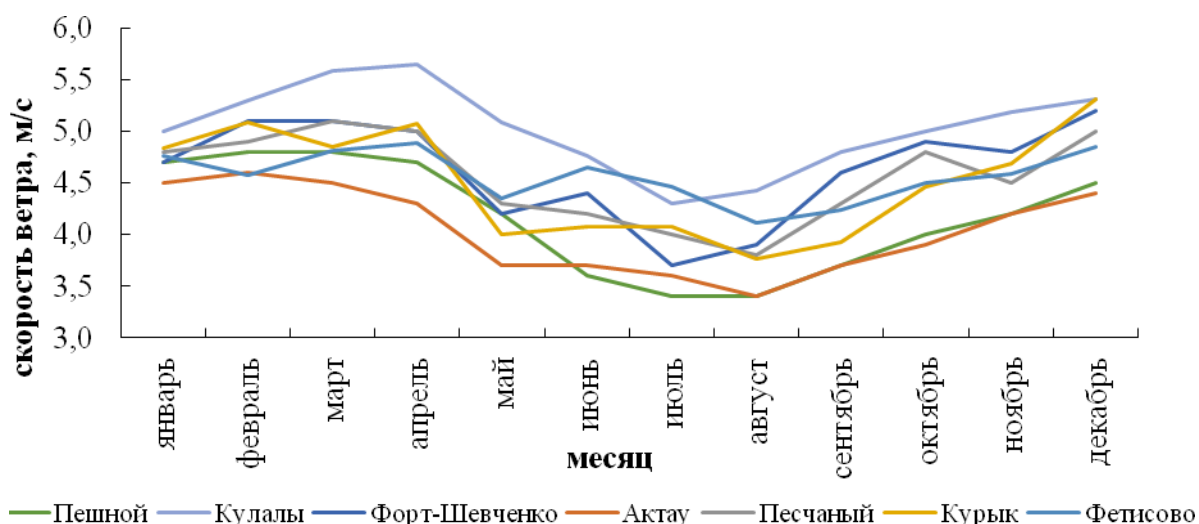


Рисунок 3.2 - Средний многолетний ход скорости ветра в казахстанской части Каспия

Наибольшие значения многолетней средней скорости ветра для Среднего Каспия составили 5,4 м/с в районе МГ Курык, а для Северной части моря 5,6 м/с (МГ Кулалы остров). Регулярные наблюдения за ветром на береговых станциях свидетельствуют о том, что для восточного побережья моря характерны более слабые ветра, чем в северо-восточной части.

Заметные изменения ветровой режим испытывает при переходе от сезона к сезону (таблица 3.2). Наибольшие скорости ветра чаще наблюдаются зимой (декабрь-март), а наименьшие летом. Однако стоит отметить, что в районе МГ Кулалы остров многолетние средние скорости ветра выше, чем в остальных пунктах наблюдений, за счет открытой местности.

Зимой диапазон значений средней скорости ветра составляет 4,4–5,3 м/с, летом 3,4–4,8 м/с. Скорость ветра в каждом районе зависит не только от времени года, но и от условий окружающего рельефа побережья.

Режим скоростей ветра характеризуется постепенным убыванием от весны к лету. В июле-августе среднемесячная скорость ветра достигает годового минимума, а затем довольно быстро увеличивается к осени.

Таблица 3.2 - Средние многолетние значения скоростей ветра по сезонам года, м/с

Станция	Зима	Весна	Лето	Осень
М Пешной	4,7	4,6	3,5	4,0
МГ Кулалы остров	5,2	5,4	4,5	5,0
МГ Форт-Шевченко	5,0	4,8	4,0	4,8
МГ Актау	4,5	4,2	3,6	3,9
МГП Песчаный (Исан)	4,9	4,8	4,0	4,5
МГП Курык	5,1	4,6	4,0	4,4
МГП Фетисово	4,7	4,7	4,4	4,4

Примечание: зеленым выделены наибольшие значения, красным наименьшие.

Динамика изменения средней скорости ветра показала тенденцию уменьшения (рисунок 3.3), так в северо-восточной части моря средние многолетние скорости ветра за период 1990-2021 гг. уменьшились

незначительно по сравнению с периодом 1960-1989 гг., и находятся в пределах 4,1 м/с, также и в средней части казахстанского сектора моря за последние 30 лет значения уменьшились на 6 % по сравнению с периодом 1960–1989 гг. и составили 4,2 м/с.

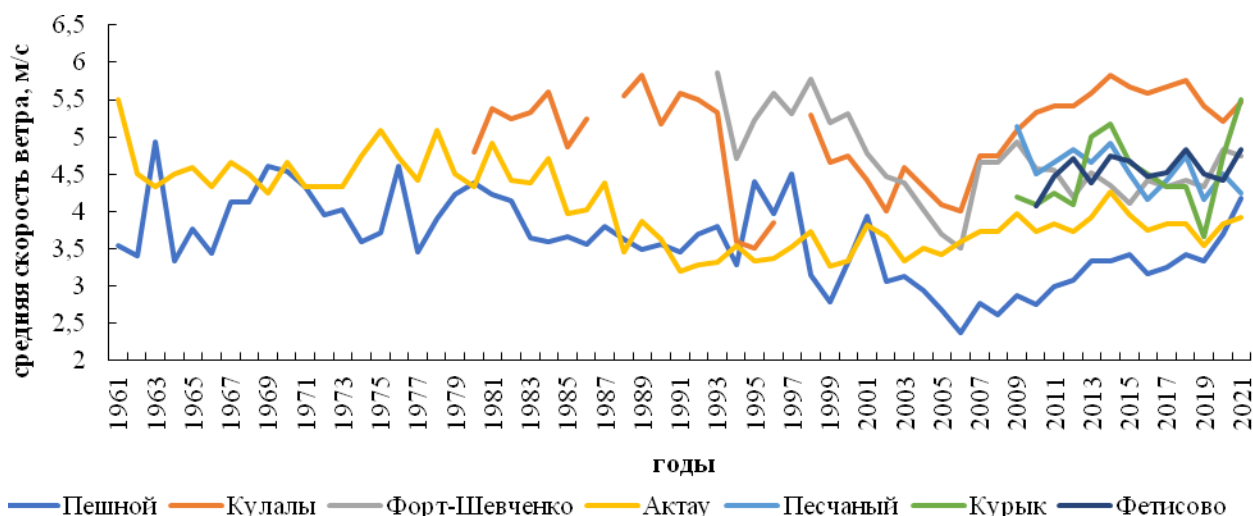


Рисунок 3.3 – График хода средней годовой скорости ветра

Среднее значение максимальной скорости ветра в период после 1990 г. увеличилось на как в северо-восточной, так и в средней части моря, на 0,9 м/с и 2,2 м/с соответственно. В свою очередь значения наблюдаемых максимальных скоростей ветра увеличились на 3 м/с и 4 м/с соответственно и составили 28 м/с.

3.2 Анализ скорости ветра по данным ДЗЗ

Проанализированы скорости ветра над акваторией моря по данным ДЗЗ (скаттерометры, реанализ) и оценена возможность использования данных реанализа для исследования ветрового волнения.

Датчики спутников – *скаттерометров* (QuikSCAT, OSCAT, RapidSCAT, ASCAT, WinSAT, SSM/I, и др), работающих на микроволновых частотах (от 300 МГц до 300 ГГц), могут проводить измерения поверхности водных объектов днем и ночью, и почти при любых погодных условиях [109]. Скаттерометры обеспечивают непрерывный набор ежедневных данных о векторе и скорости ветра, а также информацию о дожде, морском льде, ТПМ, водяном паре и имеют достаточно хорошую связь с наблюдаемыми данными [110, 111, 112, 113], однако период наблюдений небольшой: с 1992 года по настоящее время. Основными базами данных скаттерометров являются Группа изучения ветров у поверхности океана (OSWT) Центра спутниковых приложений и исследований (STAR), NESDIS/NOAA [109], Eumetsat [114].

Однако объединенной базы данных скаттерометров нет, и в основном данные представляются в виде готовых карт. Для примера, на рисунке 3.4 представлены вектора распространения ветра над Каспийским морем на 26

сентября 2022 г. с разрешением 12,5 км по данным скаттерометра QuikSCAT и HY-2 с разрешением 25 км [109, 115].

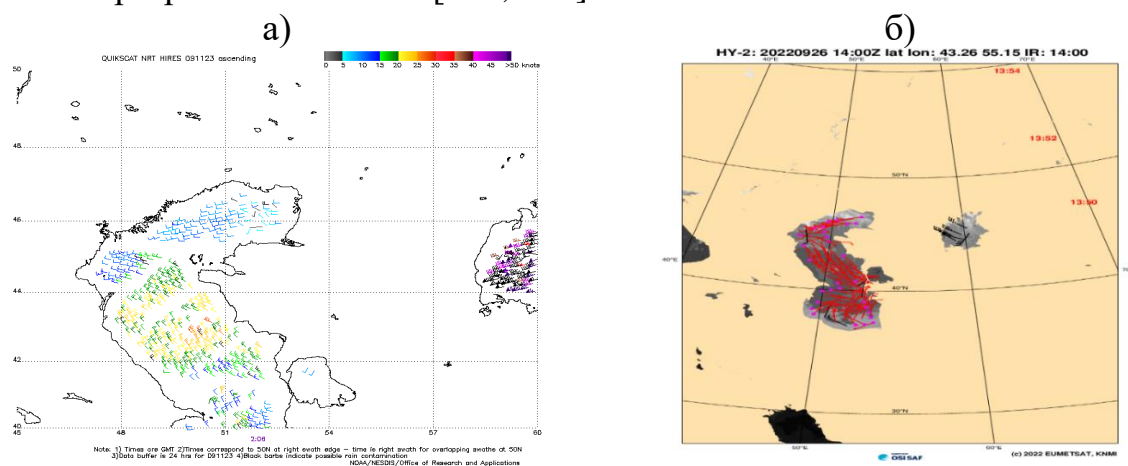


Рисунок 3.4 - Характеристики ветра над акваторией Каспийского моря по данным а) QuikSCAT и б) HY-2 на 26 сентября 2022 г. [109, 115]

Важными преимуществами *реанализов* является возможность интегрирования нескольких видов наблюдений – стационарных, аэрологических, спутниковых, радарных и др. в единую систему для корректного описания климата [116]. Существуют несколько видов данных реанализов [117], как ERA, JRA [118, 119], MERRA, NCEP, COSMO и др.

Наиболее распространенными в мировой практике данными реанализов являются реанализы ERA5 и NCEP. Карты изменения скоростей ветра по площади по данным среднемноголетних значений по реанализу NCEP-DOE Reanalysis 2 за 1981-2010 г. [120] с пространственным разрешением 2,5° и ERA5 с разрешением 0,5° за период 1959–2021 гг. представлены на рисунке 3.5.

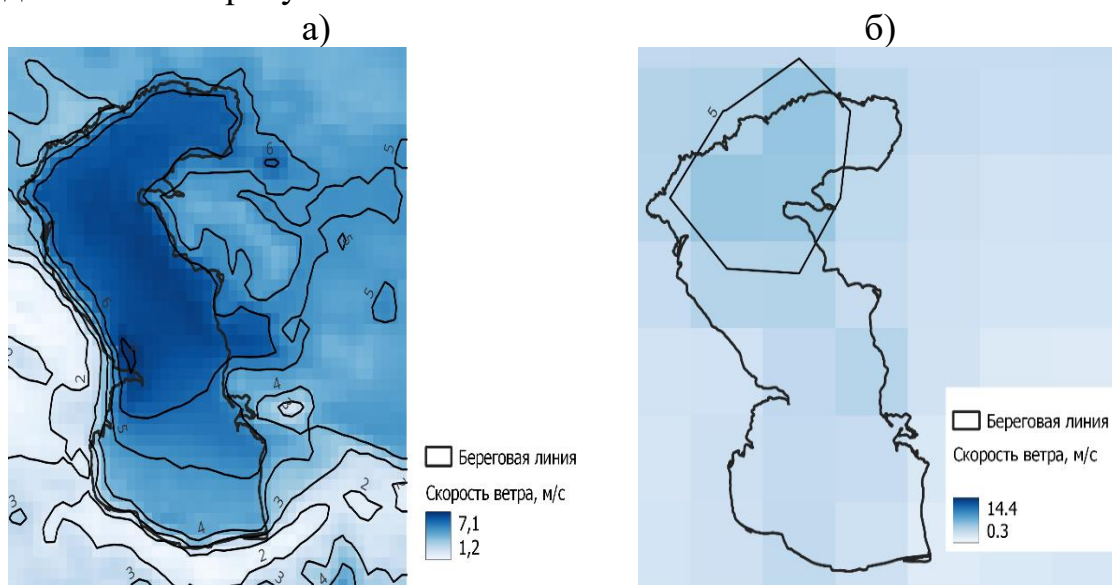


Рисунок 3.5 – Распределение средней многолетней скорости ветра по данным реанализов а) ERA5, б) NCEP

Данные реанализа NCEP представлены в виде базы данных за отдельные годы и средние значения за базовые периоды в формате netCDF. Исследования с использованием данных реанализа NCEP указывают на достаточно высокую связь между данными, а также высокую корреляционную связь с периодами изменения уровня Каспийского моря [121].

Для пространственного анализа скорости ветра над Каспийским морем были использованы ежечасные данные реанализа ERA5 [122], так как они имеют более высокое разрешение, доступ к данным свободный, базы данных за многолетний период собраны в единой системе. ERA5 - это повторный анализ ЕЦСПП пятого поколения глобального климата и погоды, предоставляющий данные с 1950 г., с записями в хранилище климатических данных за 1950–1978 гг. и с 1959 г. [122, 123].

В ERA5 скорость ветра на высоте 10 м представляет собой горизонтальную скорость ветра, или движения воздуха, на высоте десяти метров над поверхностью Земли. Согласно рекомендациям ЕЦСПП следует соблюдать осторожность при сравнении этого параметра с наблюдениями, поскольку наблюдения за ветром варьируются в небольших пространственных и временных масштабах и зависят от местного рельефа, растительности и зданий.

Связи между данными реанализа ERA5 с наблюдаемыми данными средней месячной скорости ветра на морских станциях и постах (таблица 3.3) составлены для пунктов Пешной и Актау с 1959 г., Кулалы, остров с 1979 г., Форт-Шевченко с 1993 г., Песчаный, Курык с 2009 г. и Фетисово с 2010 г.

Оценка точности данных реанализа ERA5 сравнивалась с наблюдаемыми данными с применением общепринятых статистических критериев, таких как:

1. Коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\sum \Delta x \cdot \Delta y}{\sqrt{\sum \Delta x^2 \cdot \sum \Delta y^2}} \quad (1)$$

где, x – наблюдаемые значения уровня моря, м; y – моделированные значения уровня моря, м; Δx и Δy – отклонения измеренных значений от соответствующего среднего значения уровня моря, м.

2. Коэффициенты согласия, как:

- коэффициент детерминации:

$$R^2 = \frac{\left[\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

где, x – наблюдаемые уровни моря; y – моделированные уровни моря.

- индекс согласия находится в пределах от 0 до 1, причем большое значение указывает на лучшее соответствие:

$$d = 1 - \frac{\sum(\alpha_i - y_i)^2}{\sum(y_i - \bar{x}) + (\alpha_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

- средняя абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |X - Y| \quad (4)$$

- среднеквадратическая ошибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X - Y)^2} \quad (5)$$

Анализ (таблица 3.3) показал, что данные реанализа и наблюдаемые имеют достаточно хорошую связь между собой, коэффициенты корреляции более 0,6 получены для МГ Форт-Шевченко, МГ Актау, МГП Курык, МГП Фетисово, однако для М Пешной, МГ Кулалы остров и МГП Песчаного были ниже (0,57, 0,58, 0,56 соответственно). Индекс согласия находится в пределах от 0,47 (МГП Песчаный) до 0,66 (МГП Курык), средняя абсолютная ошибка колеблется от 0,98 м/с (МГП Фетисово) до 1,72 м/с (М Пешной), а наибольшее значение средней квадратической ошибки отмечается в М Пешной 1,90.

Как было отмечено выше, местный рельеф играет свою роль при наблюдении скорости ветра на местности, поэтому в целом можно сделать вывод, что данные реанализа достаточно хорошо описывают скорость ветра над акваторией Каспийского моря.

Таблица 3.3 – Оценка точности данных реанализа ERA5

Пункт наблюдения	Период наблюдений	r	R ²	d	MAE	RMSE
М Пешной	1959–2021	0,57	0,33	0,53	1,72	1,90
МГ Кулалы, остров	1979–2021	0,58	0,34	0,51	1,29	1,61
МГ Форт-Шевченко	1993–2021	0,65	0,42	0,57	1,42	1,64
МГ Актау	1959–2021	0,65	0,42	0,52	1,41	1,54
МГП Песчаный (Исан)	2009–2021	0,56	0,36	0,47	1,59	1,81
МГП Курык	2009–2021	0,72	0,51	0,66	0,99	1,13
МГП Фетисово	2010–2021	0,65	0,41	0,56	0,98	1,16

По данным реанализа ERA5 по всем станциям имеется тенденция к снижению средней скорости ветра в последние 10-15 лет, так средние многолетние скорости ветра были: М Пешной, МГ Актау, МГП Курык, МГП Фетисово – 5,4 м/с, МГ Кулалы остров – 6,2 м/с, МГ Форт-Шевченко – 6,0 м/с, МГП Песчаный – 6,1 м/с.

По осреднённым данным пунктов наблюдений для северо-восточной части моря средние скорости за период 1959-2021 гг. были около 5,7 м/с, а на восточном побережье 5,6 м/с (рисунок 3.6).

Составлены карты пространственно-временного распределения скорости ветра по месяцам по данным реанализа ERA5 (рисунок Б.1 Приложения Б).

В северо-восточной части моря за период 1990-2021 гг. скорости ветра увеличились на 2,5 % по сравнению с периодом 1961-1989 гг., и находятся в пределах 5,82 м/с, в средней части казахстанского сектора моря за последние 30 лет значения увеличились на 4 % по сравнению с периодом 1961–1989 гг. и составили 5,68 м/с (рисунке 3.6).

Над акваторией Каспийского моря за период 1959–2021 гг., средние месячные скорости ветра по данным реанализа ERA5 колебались от 1,83 м/с (июль) до 10 м/с (февраль).

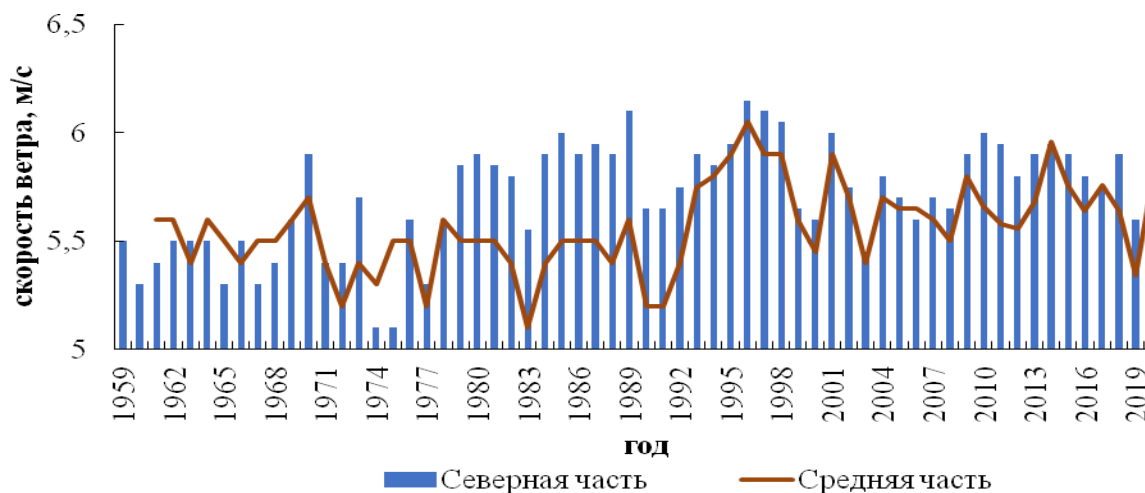


Рисунок 3.6 – График хода средней скорости ветра по данным реанализа ERA5

Внутригодовое распределение скорости ветра представлено в таблице 3.4, где видно, что наибольшие средние скорости наблюдаются в холодный период года (сентябрь-февраль).

Таблица 3.4 – Внутригодовое распределение скорости ветра по данным реанализа ERA5 за 1959–2021 гг.

Месяц	Скорость ветра, м/с		
	минимум	среднее	максимум
Январь	2,1	5,2	8,2
Февраль	2,8	6,4	10,0
Март	2,4	4,8	7,2
Апрель	2,1	4,6	7,0
Май	2,0	4,9	7,7
Июнь	1,9	4,2	6,6
Июль	1,8	4,2	6,7
Август	1,9	4,4	6,9
Сентябрь	2,3	5,3	8,4
Октябрь	2,6	5,2	7,9
Ноябрь	2,6	5,5	8,4
Декабрь	2,6	5,4	8,2

Таким образом, оценка точности данных реанализа ERA5 показала удовлетворительные результаты. Внутригодовой ход изменения средней скорости ветра схож с описанием анализа наблюдаемых данных на береговых морских станциях и постах. В связи с этим целесообразно

дальнейшее использование данных реанализа для исследования ветрового волнения.

3.3 Направление ветра

Следующей анализируемой характеристикой ветровых условий является направление ветра. Направление ветра совместно с его скоростью оказывает большое воздействие на распределение воздушных потоков, влияет на качество атмосферного воздуха.

Оценка наблюдаемых данных показала, что в годовом разрезе отмечается высокая повторяемость восточных (МГП Фетисово – 23 %, МГ Кулалы остров – 22 %, М Пешной, МГ Актау – 21 %, МГП Курык – 19 %) и юго-восточных (МГП Песчаный – 21 %, МГП Курык – 19 %), северных (МГ Форт-Шевченко – 21 %) ветров. Наиболее редкими являются ветра южного направления (таблица 3.5).

Исследование повторяемости направлений ветра по 8 румбам в процентном соотношении показало, что в холодные периоды года, зимой и осенью преобладают ветра восточного румба, летом чаще наблюдаются ветра северного, западного и северо-западного направления (таблица Б.1 – Б.2 Приложение Б).

Таблица 3.5 - Среднегодовая повторяемость направлений ветра и штилей, %

Станция	Направление								Штиль
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
М Пешной	12	7	21	9	9	9	15	7	13
МГ Кулалы, остров	13	15	22	9	6	7	12	11	7
МГ Форт-Шевченко	21	15	13	15	6	4	9	11	6
МГ Актау	14	11	21	13	6	5	15	11	4
МГП Песчаный (Исан)	9	18	17	21	5	5	8	16	-
МГП Курык	14	10	19	19	6	7	9	11	5
МГП Фетисово	6	20	23	17	5	10	11	9	-

Примечание: синим выделены наибольшие значения, красным наименьшие.

На большей части казахстанского сектора Каспийского моря в зимний период преобладают ветра восточного направления (рисунок 3.7): М Пешной 30,3 %, МГ Кулалы остров 30,2 %, МГ Актау 33,9 %, МГП Песчаный 37,4 %, МГП Курык 27,6 %, МГП Фетисово 28,4 %. В районе Мангышлакского залива преобладают ветра северного направления (17,9 %) и юго-восток (18,3 %). Зимние циркуляции в основном обусловлены влиянием западной и юго-западной периферий азиатского максимума, также термическими различиями между морем и сушей.

Режим ветра в теплый период года резко меняется и вследствие частого воздействия азорского максимума происходит вынос воздушных масс из крайних северных широт континента в центральные районы. В связи с этим почти над всей акваторией моря преобладают северные и западные ветра.

В весенний период в северо-восточной части Каспийского моря преобладают восточные ветра: М Пешной 23,3 %, МГ Кулалы остров 17,7 % (рисунок 3.7). В районе Мангышлакского залива наиболее чаще наблюдались ветра северного направления (19,9 %). На восточном берегу Каспийского

моря преобладающими направлениями ветра за рассматриваемый период были западные (МГ Актау 18,2 %), юго-восточные (МГП Песчаный 31,1 %, МГП Курык 19,2 %) и восточные (МГП Фетисово 19,7 %) ветра.

Летом над акваторией Каспийского моря наблюдалось несколько преобладающих направлений ветра: западное (М Пешной 19,6 %, МГ Актау 25,5 %, МГП Курык 15,9 %), северное в районе МГ Форт-Шевченко (27,4 %), восточное (МГП Фетисово 18,3 %), северо-восточное (19,4 %) у МГ Кулалы остров, северо-западное (МГП Песчаный 35,1 %) (рисунок 3.7).

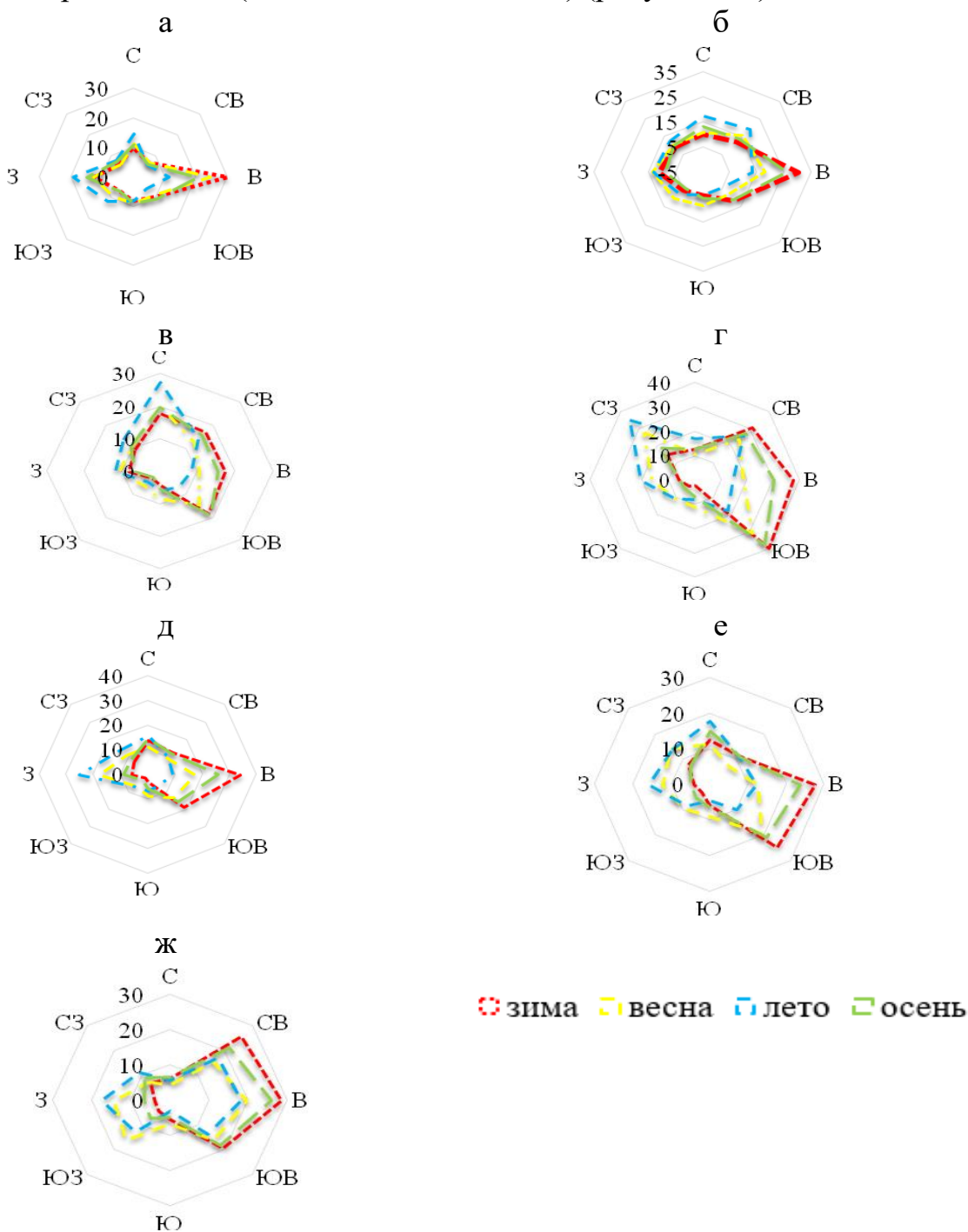


Рисунок 3.7 - Роза повторяемости направления ветра по сезонам года: а) МГ Пешной, б) МГ Кулалы, остров, в) МГ Форт-Шевченко, г) МГ Актау, д) МГ Песчаный, е) МГ Курык, ж) Фетисово

Осеннее распределение ветров над акваторией Северного и Среднего Каспия сходно с зимним (рисунок 3.7). Наибольшую повторяемость имеют ветра восточных румбов: М Пешной - 20,5 %, МГ Кулалы, остров - 26,0 %, МГ Актау - 25,9 %, МГП Курык - 23,7 %, МГП Фетисово - 25,9 %, но также в некоторых районах моря отмечается преобладание ветров северных (МГ Форт-Шевченко 19,7 %) и юго-восточных (МГП Песчаный 37,9 %) направлений.

Стоит отметить, что во все сезоны года одними из преобладающих направлений ветра являются восточные и северные, то есть береговые ветра. Проанализировав сезонные изменения направления ветра, можно сделать вывод, что режим ветра в теплое время года резко изменяется в сравнении с холодным (рисунок 3.8).

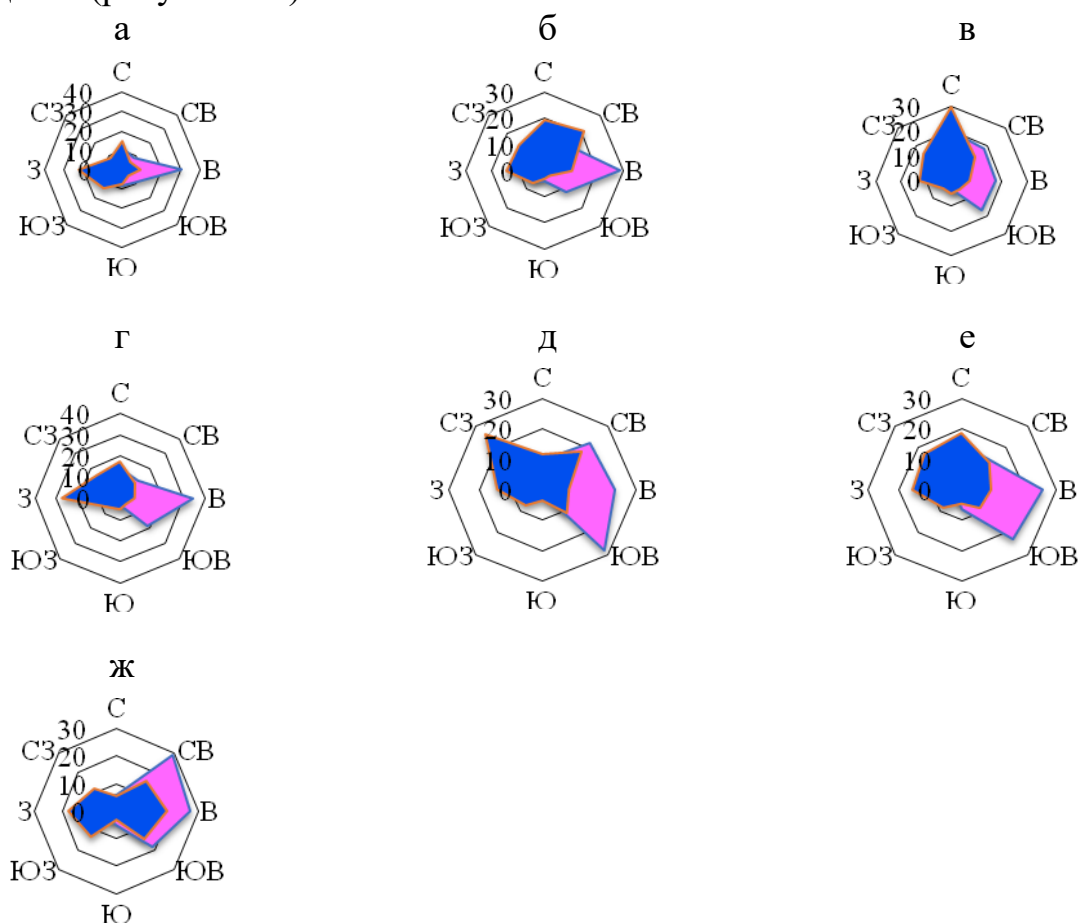


Рисунок 3.8 - Совмещенные розы ветров за январь (—) и июль (—):
а) МГ Пешной, б) МГ Кулалы, остров, в) МГ Форт-Шевченко, г) МГ Актау,
д) МГ Песчаный, е) МГ Курык, ж) Фетисово

Таким образом, в исследуемом районе Каспийского моря, вполне отчетливо проявляются сезонные различия в режиме направления ветров, что говорит о муссонной составляющей [124]. Более наглядное представление дают графики годового хода повторяемости ветров, дующих как с моря на сушу, так и с суши на море (рисунок 3.9).

В мелководной северной части Каспийского моря муссонность в ветровом режиме сильнее выражена на северо-востоке (М Пешной), а в

районах Среднего Каспия проявляется менее отчетливо. Внутригодовой ход показывает, что в теплый период года количество ветра, направленного на берег меньше, чем в холодный период года, в свою очередь в теплый период года увеличивается количество ветров, направленных в сторону моря.

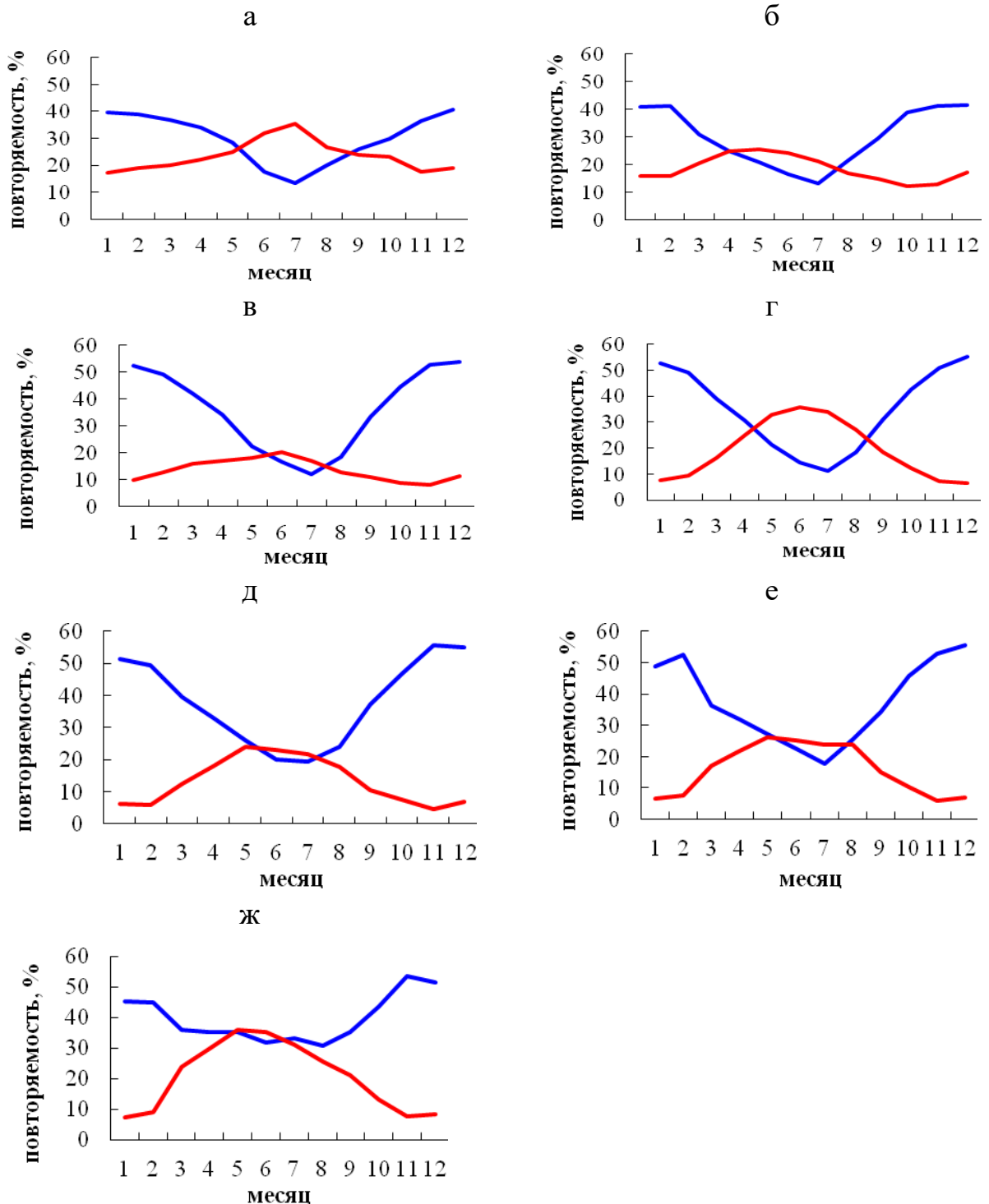


Рисунок 3.9 - Внутригодовой ход повторяемости (%) морских (—) и береговых (—) ветров. а) МГ Пешной, б) МГ Кулалы, остров, в) МГ Форт-Шевченко, г) МГ Актау, д) МГ Песчаный, е) МГ Курык, ж) Фетисово

Анализ повторяемости ветров при различных градациях скоростей и направления (Таблица Б.3 Приложения Б) показал, что в казахстанском секторе, согласно данным морских станций, в основном преобладают ветра

со скоростями от 2 до 5 м/с, направленные на восток и северо-восток. В годовом разрезе преобладают ветра со скоростью 2-3 м/с: М Пешной (25,7 %), МГ Форт-Шевченко (30,5 %), МГ Актау (34,9 %), МГП Фетисово (32,5 %), а в МГ Кулалы остров, МГП Песчаном и МГП Курыке преобладали скорости ветра в градации 4-5 м/с (25,7 %, 35,9 %, 29,4 % соответственно).

Если рассматривать по месяцам, то преобладающими градациями скоростей по всем рассматриваемым станциям были скорости ветра в пределах от 2 м/с до 5 м/с. Так, во все месяцы года в северо-восточной части моря наиболее часто наблюдались ветра со скоростью ветра 2-3 м/с восточных и западных румбов. В районе МГ Кулалы острова преобладали скорости ветра в градации 4-5 м/с направленные на восток, северо-восток, запад и северо-запад. Однако на восточном побережье Среднего Каспия однонаправленных тенденций не было, там преобладали скорости ветра 2–3 м/с и 4-5 м/с восточных и западных румбов.

В свою очередь скорости ветра более 15 м/с от общего количества составляют: М Пешной – 1,02 %, МГ Кулалы остров – 0,83 %, МГ Форт-Шевченко – 1,28 %, МГ Актау – 0,27 %, МГП Песчаный – 0,17 %, МГП Курык – 0,23 %, МГП Фетисово – 0,12 %.

3.4 Штормовые ветра

Шторм – опасное явление погоды, складывающееся из одновременного воздействия различных гидрометеорологических факторов: сильного ветра, развитого волнения, сгонов-нагонов, обильного выпадения осадков, а в зимнее время – подвижек ледяного покрова, метелей, обледенения. За шторм принимается ветер со скоростью 15 м/с и более с продолжительностью не менее 6 часов. Если разрыв между такими ветрами составляет 6 часов, то в статистическом анализе они рассматриваются, как два отдельных случая. Несмотря на малую повторяемость, скоростей ветра более 15 м/с представляют большой интерес. Так как, усиление ветра может привести к продолжительности рейсов судов, прекращению погрузочно-разгрузочных работ. Ветер такой силы обычно вызывает сильное волнение, которое может привести к возникновению аварийных ситуаций при проведении работ на море.

Порывы ветров 15 м/с и более (для района порта или прибрежной зоны) относятся к опасным и стихийным гидрометеорологическим явлениям на морях. Скорости ветра превышающие 12 м/с представляют опасность для малых судов, при скоростях ветра 12–16 м/с прекращается промысел и затрудняется проводка судов в порт и из него. Все работы на моря прекращаются, когда скорости ветра могут достигать 20–25 м/с [125].

Расчеты показали, что общее количество случаев со скоростями ветра более 15 м/с на станции М Пешной за исследуемый период составляет 894, на МГ Кулалы остров – 284, на МГ Форт-Шевченко – 447, на МГ Актау – 225, на МГП Песчаном – 29, на МГП Курык – 35, на МГП Фетисово – 19 (таблица 3.6).

Здесь можно отметить, что на восточном побережье Каспия штормовая деятельность отчетливо выражена в районе Мангышлакского полуострова у МГ Форт-Шевченко, где в значительной степени сказывается мысовый эффект. В данной части моря наибольшее количество штормов приходится на холодный период года, что видно на таблице 3.7.

Как видно из таблицы 3.5 в северной части Каспийского моря на скорости ветра выше 22 м/с приходятся 4 % случаев, а в средней части моря 3,4 %. Ветра со скоростью более 26 м/с наблюдались одинаковое количество раз, как в северной, так и в средней частях моря. В свою очередь ветра 15–17 м/с в северной части моря встречаются чаще, чем в средней.

Проведенный анализ штормовых ветров по направлениям (таблица 3.7) показал, что в северо-восточной части моря наибольшую повторяемость имеют юго-восточные, восточные, восток юго-восточные от 14 % до 17 %, другие направления выражены слабее. В районе МГ Кулалы остров преобладает ветер северо-западного направления (25 %).

Таблица 3.6 – Сравнительные показатели характеристик повторяемости штормовых ветров

Станция	Общее число случаев	Максимальный ветер		Повторяемость скоростей ветра							
		Скорость	Направление	15-17		18-21		22-25		более 25	
				ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%
М Пешной	894	28	з, зсз, юз, вюв	520	58	332	37	37	4	5	1
МГ Кулалы остров	284	28	юз	238	84	43	15	1	0,3	2	0,7
МГ Форт-Шевченко	467	28	юз, сз, юв	288	61,7	162	34,7	14	3	3	0,6
МГ Актау	225	24	з, сз	163	72	58	26	4	2		
МГП Песчаный	29	27	юв	21	72,4	5	17,2	2	7,0	1	3,4
МГП Курык	35	22	св	27	77,1	7	20	1	2,9		
МГП Фетисово	19	20	з	16	84,2	3	15,8				

Примечание: ч.с. – число случаев.

На акватории Мангышлакского полуострова и на большей части восточного побережья преобладают ветра, дующие на юго-восток (МГ Форт-Шевченко 32 %, МГП Песчаный 34 %, МГП Курык 43 %, МГП Фетисово 32 %). Однако в районе МГ Актау чаще наблюдаются северо-западные (31 %) направления ветра, а юго-западные, юго-юго-западные, северо-восточные представлены единичными случаями.

Характер внутригодового хода повторяемости штормовых ветров представлен в таблице 3.8. Максимальная повторяемость штормов в холодный период года наблюдается в октябре, декабре (в МГП Песчаном 21 %), в феврале (МГ Актау 22 %), в теплый период года, в марте (М Пешной 16 %, МГ Кулалы остров 20 %, МГ Форт-Шевченко 18 %) и апреле (МГП Курык 31 %, МГП Фетисово 26 %).

Таблица 3.7 – Распределение штормового ветра по направлениям

Направление ветра	М Пешной		МГ Кулалы остров		МГ Форт-Шевченко		МГ Актау		МГП Песчаный (Исан)		МГП Курык		МГП Фетисово	
	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%
С	18	2	5	2	21	4,5	5	2,2	1	3	1	2,9		
ССВ	12	1	2	1	8	1,7	2	0,9						
СВ	28	3	31	11	83	17,8	2	0,9	2	7	2	5,7	3	15,8
ВСВ	30	3	5	2	12	2,6	1	0,4					2	10,5
В	135	15	32	11	11	2,4	6	2,7	5	17	1	2,9	2	10,5
ВЮВ	149	17	4	1	9	1,9	14	6,2						
ЮВ	127	14	19	7	150	32,1	15	6,7	10	34	15	42,9	6	31,6
ЮЮВ	4	0	4	1	17	3,6	8	3,6						
Ю	6	1	12	4	10	2,1	2	0,9			10	28,6	2	10,5
ЮЮЗ	11	1			1	0,2	1	0,4						
ЮЗ	83	9	28	10	25	5,4	1	0,4			3	8,6		
ЗЮЗ	76	9	8	3			4	1,8						
З	85	10	39	14	22	4,7	23	10,2	1	3			1	5,3
ЗСЗ	49	5	20	7	17	3,6	53	23,6	2	7				
СЗ	66	7	72	25	79	16,9	70	31,1	8	28	3	8,6	3	15,8
ССЗ	15	2	3	1	2	0,4	18	8						
Всего	894	100	284	100	467	100	225		29	100	35	100	19	100

Примечание: красные – наименьшие значения, зеленые – наибольшие, ч.с. – число случаев.

В течение года число случаев с сильным ветром распределяется довольно неравномерно. На Северном Каспии чаще такие ветра наблюдаются весной, заметно реже летом. На восточном побережье Среднего Каспия максимум числа случаев со скоростью ветра более 15 м/с приходится на зиму и начало весны, минимум также на лето.

Таблица 3.8 – Повторяемость штормовых ветров на Каспийском море по месяцам

Месяц	М Пешной		МГ Кулалы остров		МГ Форт-Шевченко		МГ Актау		МГП Песчаный (Исан)		МГП Курык		МГП Фетисово	
	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%
Январь	116	13	7	2	38	8	35	15,6	1	3,4	5	14,3	2	10,5
Февраль	98	11	22	8	59	13	49	21,8	4	13,8	2	5,7	3	15,8
Март	146	16	57	20	84	18	19	8,4	3	10,4	7	20	4	21,1
Апрель	110	12	50	18	57	12	20	8,8	3	10,4	11	31,4	5	26,3
Май	64	7	12	4	31	7	13	5,8	1	3,4	1	2,9		
Июнь	37	4	18	6	35	7	8	3,6	1	3,4				
Июль	8	1	2	1	10	2	2	0,9	1	3,4				
Август	15	2	4	2	9	2	1	0,4					1	5,3
Сентябрь	27	3	7	2	17	4	2	0,9						
Октябрь	57	6	40	14	31	7	22	9,8	6	20,7			3	15,8
Ноябрь	112	13	30	11	43	9	30	13,3	3	10,4				
Декабрь	104	12	35	12	52	11	24	10,7	6	20,7	9	25,7	1	5,3

Примечание: жирным выделены наибольшие значения числа случаев, ч.с. – число случаев

В исследуемом районе Каспийского моря штормовые ветра бывают часто во все сезоны года, однако, чем выше скорость ветра, тем реже она встречается.

Динамика изменения количества случаев превышения скоростей ветра 15 м/с не имеет однонаправленных трендов, так в М Пешной, МГ Форт-Шевченко, МГ Актау, МГП Песчаный в последние годы их количество уменьшается, однако у МГ Кулалы остров и МГП Курык их количество направлено в сторону повышения, а в МГП Фтеисово изменении не наблюдается.

Согласно Атласа [126] в районе МГ Форт-Шевченко максимальные скорости ветра достигали 34 м/с, с максимальными порывами до 40 м/с. В Мангистауской области по степени опасности ветров наблюдались ветра значительные (10–100 часов) и сильные (более 100 часов).

Выводы к 3 главе:

1. Многолетние средние скорости ветра по наблюдаемым данным в казахстанском секторе моря составляют от 4 м/с (МГ Актау) до 5 м/с (МГ Кулалы остров), максимальные в пределах от 20 м/с (МГП Фетисово) до 28 м/с (М Пешной, МГ Кулалы остров, МГ Форт-Шевченко). Регулярные наблюдения за ветром на береговых станциях свидетельствуют о том, что для восточного побережья моря характерны более слабые ветра, чем в северо-восточной части.

2. Существует тенденция уменьшения средней скорости ветра. Так в МГ Форт-Шевченко в период 1922–1950 гг. средняя скорость ветра составляла 7,2 м/с, за 1993–2021 гг. – 4,6 м/с. У МГ Актау многолетние средние скорости ветра за 2000–2021 гг. уменьшились с 5 м/с до 4,2 м/с по сравнению с периодом 1961–1989 гг.

3. Во внутригодовом распределений режим средней скорости ветра характеризуется постепенным убыванием от весны к лету, с минимумом в июле-августе. Наибольшие скорости ветра чаще наблюдаются зимой (декабрь-март).

4. Динамика изменения средней скорости ветра показала тенденцию уменьшения, так в северо-восточной части моря средние многолетние скорости ветра за период 1990-2021 гг. уменьшились незначительно по сравнению с периодом 1961-1989 гг., и находятся в пределах 4,1 м/с, также и в средней части казахстанского сектора моря за последние 30 лет значения уменьшились на 6 % по сравнению с периодом 1960–1989 гг. и составили 4,2 м/с.

5. Среднее значение максимальной скорости ветра в период после 1990 г. увеличилось на как в северо-восточной, так и в средней части моря, на 0,9 м/с и 2,2 м/с соответственно.

6. Лучше описывают режим скоростей ветра над Каспийском морем данные реанализа ERA5, результат оценки точности которых по статистическим критериям показал, что коэффициент связи изменяется от

0,56 до 0,72, индекс согласия от 0,47 до 0,66, средняя абсолютная ошибка не превышает 1,72 м/с, среднеквадратическая ошибка находится в пределах 1,13–1,90.

7. В северо-восточной части моря за период 1990-2021 гг. скорости ветра увеличились на 2,5 % по сравнению с периодом 1961-1989 гг., и находятся в пределах 5,82 м/с, в средней части казахстанского сектора моря за последние 30 лет значения увеличились на 4 % по сравнению с периодом 1961–1989 гг. и составили 5,68 м/с.

Над акваторией Каспийского моря за период 1959–2021 гг., средние месячные скорости ветра по данным реанализа ERA5 были от 1,83 м/с (июль) до 10 м/с (февраль). Наибольшие средние скорости наблюдаются в холодный период года (сентябрь-февраль).

Так данные реанализа ERA5 и наблюдаемые на морских станциях и постах имеют достаточно хорошую связь и одинаковый внутригодовой ход. В связи с этим целесообразно использование данных реанализа для дальнейшего исследования ветрового волнения.

8. Наблюдается высокая повторяемость восточных, юго-восточных, северных направлений ветра. В холодные периоды года (зимой и осенью) преобладают ветра восточного румба (направленные на берег), летом чаще наблюдаются ветра северного, западного и северо-западного (направленные на море) направления.

В мелководной северной части Каспийского моря муссонность в ветровом режиме сильнее выражена на северо-востоке (М Пешной), а в районах Среднего Каспия проявляется менее отчетливо.

В основном преобладают ветра со скоростями от 2 до 5 м/с, направленные на восток и северо-восток.

9. С года начала наблюдений общее количество случаев с равным или превышением скорости ветра в 15 м/с было 1933, из них 46 % приходится на северо-восточную часть моря (М Пешной). Преобладающими направлениями ветра являются восточные и северо-западные, которые могут влиять на коротко периодические изменения уровня моря под воздействием ветра.

В течение года число случаев с сильным ветром (равное или более 15 м/с) распределяется довольно неравномерно. На Северном Каспии чаще наблюдаются весной, заметно реже летом. На восточном побережье Среднего Каспия максимум числа случаев со скоростью ветра более 15 м/с приходится на зиму и начало весны, минимум также на лето.

Динамика распространения сильных ветров не имеет однонаправленных трендов.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНЕНИЯ В КАЗАХСТАНСКОЙ ЧАСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Ветровое волнение — один из основных гидрометеорологических факторов, определяющих безопасность и экономическую эффективность мореплавания [127].

Размеры и формы волн определяются их элементами [128] (рисунок 4.1). Элементами волн являются величины, которые определяют их форму, размеры и период колебаний. Основными элементами волны являются его высота, период, длина, скорость распространения, направление распространения [128].

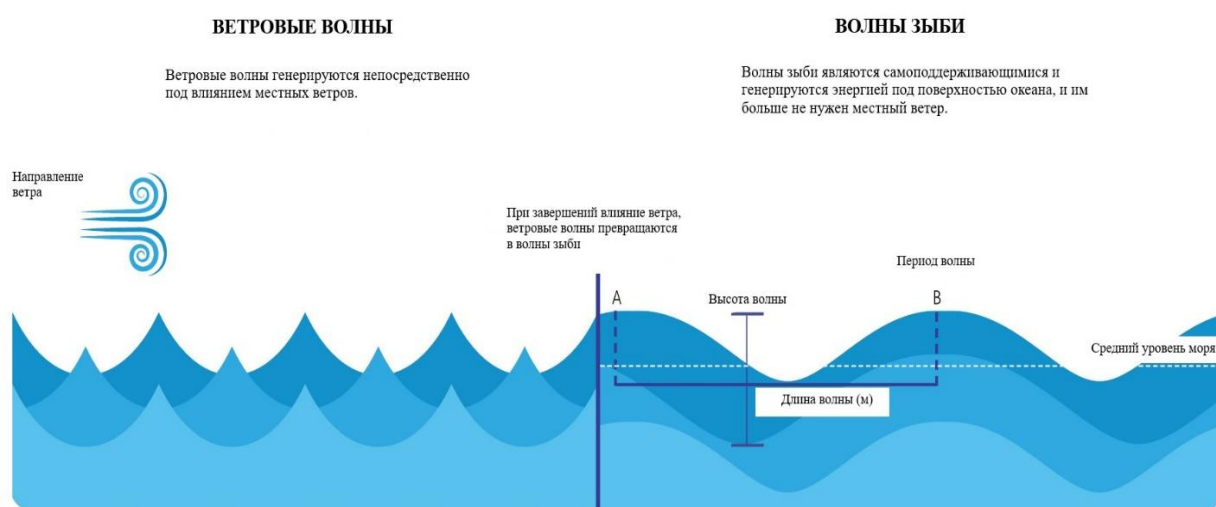


Рисунок 4.1 - Характеристики ветрового волнения

Само ветровое волнение может состоять из волн двух типов:

1. Ветровых волн, вызванных ветром и которые находятся в момент наблюдений под непосредственным воздействием;
2. Волны зыби, вызванные ветром, но не находящиеся под воздействием ветра.

Основными волнообразующими факторами [129] являются:

1. Скорость и продолжительность действия ветра;
2. Длина разгона, расстояние от подветренного берега до расчетной точки;
3. Глубина водоема;
4. Очертание береговой линии.

Если ветер постоянной силы и направления действует на водоем достаточно длительное время, то волны будут расти до тех пор, пока не достигнут полностью развитого состояния, соответствующего данной скорости ветра. Высота, период, длина и скорость волн зависят от скорости ветра. При этом, чем больше скорость ветра, тем больше необходимо времени, чтобы волны достигли предельного развития. В связи с этим, при

больших скоростях ветра волны редко достигают предельных значений, так как штормовые ветра бывают непродолжительными [129, 128].

4.1 Характеристики волнения по данным наземных наблюдений

Характеристики волнения, определенные по данным наблюдений прибрежных станций, характеризуют волнение только ограниченной акватории моря, непосредственно примыкающей к пункту наблюдения.

На сети морских станций в казахстанской части Каспийского моря визуальные наблюдения за волнением в настоящее время производятся на 7 станциях и постах: МГ Кулалы остров, МГ Форт-Шевченко, МГП Саура, МГ Актау, МГП Песчаный (Исан), МГП Курык, МГП Фетисово в сроки 00, 06, 12, 18 ч по СГВ (рисунок 4.2) [130].



Рисунок 4.2 - Морская наблюдательная сеть Казахстана за волнением

Координаты расположения, период наблюдения за волнением, общее количество проанализированных наблюденных данных приведено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Общее количество значения волнения по пунктам наблюдении

Станция	Координаты		Период наблюдений	Общее количество проанализированных данных
	с.ш.	в.д.		
МГ Кулалы остров	44.98	50.01	2001–2021	25312
МГ Форт-Шевченко	44.55	50.25	1993–2021	26744
МГПСаура	44.22	50.8	2010–2021	16173
МГ Актау	43.6	51.22	1980–2021	22062
МГП Песчаный (Исан)	43.19	51.27	2009–2021	17855
МГП Курык	43.18	51.66	2009–2021	15991
МГП Фетисово	44.22	50.8	2006–2021	20666

Анализ данных по прибрежным станциям и постам показал, что наибольшие высоты волн наблюдались в Среднем Каспии на МГ Актау и МГП Песчаном (таблица 4.2). Также у МГ Кулалы остров, расположенной вдали от берега, чаще фиксируются значительные волны высотой более 0,75

м, это служит подтверждением, что определяющим фактором волнения на открытой акватории водоема является ветер. Режим ветрового волнения определяется главным образом распределением скорости и направления преобладающих ветров.

Таблица 4.2 – Число случаев высоты волнения по градациям

Станция	Период наблюдений	Число случаев с высотой волны в интервале, м			
		0,75-1,25	1,25-2	2-3,5	3,5-6
МГ Кулалы остров	2001–2021	3519	583	9	
МГ Форт-Шевченко	1993–2021	959	194	1	
МГП Саура	2010–2021	2953	1333	7	
МГ Актау	1980–2021	1177	444	74	1
МГП Песчаный	2009–2021	2685	1026	38	1
МГП Курык	2009–2021	336	21		
МГП Фетисово	2006–2021	209	11		

Внутригодовое распределение максимального волнения в многолетнем разрезе показало (таблица 4.3), что волнение высотой более 2 м в Северном Каспии наблюдается в течение всего года. В Среднем Каспии сильное волнение в 2,5 м наблюдается на МГ Форт-Шевченко в январе, на МГП Сауре сильное волнение наблюдалось в декабре, на МГ Актау сильное волнение встречается во все месяцы года с наибольшими высотами волны в холодный период года (в 3,5 м – январь, октябрь, ноябрь) и с максимальной высотой волны в декабре 4,5 м, на МГП Песчаном сильное волнение наблюдается во всех месяцах года, кроме сентября, а максимальное волнение было в августе, на МГП Курык и МГП Фетисово сильное волнение наблюдается январе, апреле и сентябре [104].

Таблица 4.3 – Внутригодовое распределение высоты максимального волнения

Станция/месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
МГ Кулалы остров	2	2	2,5	2,5	2	2,5	2	2	2	2	3	2
МГ Форт-Шевченко	2,5	2	2	2	1,5	2	1,5	1,5	1,5	1,5	2	1,5
МГП Саура	2	2	2	2	2	1,8	2	1,5	2	2	2	2,5
МГ Актау	3,5	3	2,7	3	3	2	2	2,5	3	3,5	3,5	4,5
МГП Песчаный (Исан)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4,5	2	2,5	2,5	2,5
МГП Курык	1,5	1,5	1	2	1	1	1,5	1	2	1,5	1,5	1,5
МГП Фетисово	2	1,5	1	1,5	1	1,5	1	1	2	1	1,5	1

Примечание: синим цветом выделены месяцы с сильным волнением по шкале волнения.

По наблюдаемым данным выделить года с более активными волновыми процессами достаточно трудно: в каждом исследуемом году фиксировалось значительное волнение.

Для исследования волнового режима прибрежных территорий моря составлен каталог сильного волнения прибрежных районов Каспийского моря (Приложение В). Сильное волнение (высотой волны более 2 м) на море может привести к разрушению береговых сооружений, судов, приводит к

задержке заходов судов и выхода из него, разрушение берегов и прибрежных пляжей. Анализ собранных материалов позволил выделить наибольшие высоты волн, преобладающее направление волнения и ветровые условия, приводящие к образованию сильного волнения и продолжительность данного явления.

Согласно критериям опасного и стихийного волнения на Каспийском море [2] для порта Баутино у г. Форт-Шевченко, порта Актау у г. Актау волны высотой более 4 м представляют опасность для расположенных близ них сооружений и т.д. объектов.

Сильное волнение, как правило, вызывает ветер северо-западного и юго-восточного направления, причем не всегда его можно отнести к категории «сильный». Даже умеренный ветер, имеющий устойчивое направление, более суток может вызвать сильное волнение.

На рисунке 4.3 представлены преобладающие направления волнения при высоте волны 2 м и более.

В казахстанском секторе моря сильное волнение равное или выше 2 м наблюдалось 265 раз за период 1980–2021 гг. Преобладает волнение западного направления, повторяемость которого за исследуемый период составила 30 %. Из остальных направлений волнения следует отметить северо-западное и юго-восточное, повторяемость которых составила 26 % и 25 % соответственно [131,132].

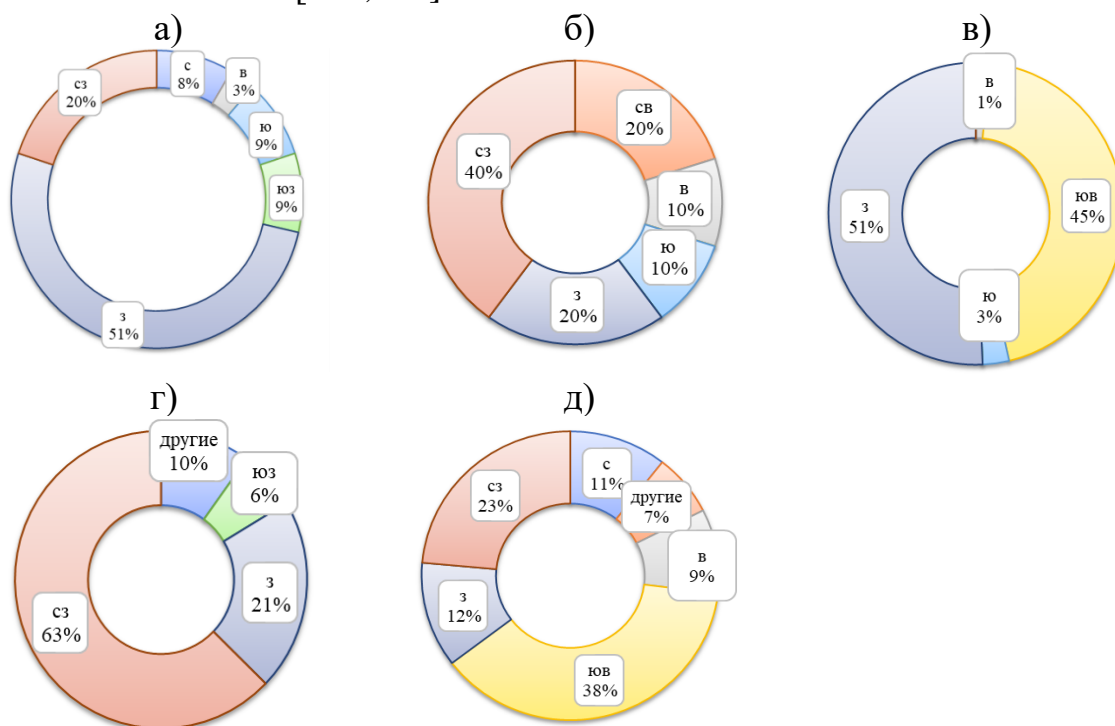


Рисунок 4.3 - Преобладающее направление сильного волнения по станциям:
 а) МГ Кулалы остров б) МГ Форт-Шевченко, в) МГП Саура, г) МГ Актау,
 д) МГП Песчаный

Согласно каталогу «Сильного волнения»:

- В МГ Актау наблюдается 62 случая волнения, из них 39 северо-западного направления, скорости ветра были от 3 м/с до 20 м/с;

- максимальная продолжительность волнения высотой 2 м было 24 часа (1 ноября 2001 года), при скорости ветра 3-6 м/с северо-западного направления;
- На МГ Кулалы остров с 2001 по 2021 год было наблюденно 35 случаев волнения высотой 2 м, с единичным случаем превышения 3 м (21 ноября 2003 года), при скорости ветра 16 м/с юго-западного направления;
 - В районе МГ Форт-Шевченко 10 случаев волнения выше 2 м, из них 25 января 2000 года волнение было равно 2,5 м при скорости ветра 24 м/с с южным направлением;
 - В МГП Саура наблюденно 69 случая равного или превышавшего волнение высотой 2 м, из них в 3 случаях высота волны была 2,5 м (28 декабря 2017 г., 13 декабря 2018 года и 15 декабря 2018 года);
 - В МГП Песчаном с 2009 года наблюденно 85 случаев превышения волнения 2 м; максимальное волнение было 14 августа 2009 года в 4,5 м западного направления при скорости ветра 6 м/с.
 - В МГП Курык наблюденно только 2 случая с высотой волны 2 м (30 сентября 2009 года, 30 апреля 2014 года);
 - В МГП Фетисово 2007–2021 гг. было 2 случая с высотой волны 2 м (26 января 2007 года, 18 сентября 2007 года).

4.2 Характеристика волнения на основе данных ДЗЗ

Данные альтиметров.

С начала 1990 года увеличилось количество наблюдений со спутников Земли, особенно началось развитие спутниковых альтиметрических измерений [133, 134].

Спутниковая альтиметрия – измерение высоты спутника относительно поверхности Земли по времени прохождения сигнала, посылаемого и получаемого после отражения от поверхности спутником [135]. Главной особенностью измерений альтиметрами является то, что облачность не влияет на измерения, и данные однородны как по пространственному распределению так и регулярны во времени [136-139, 109, 140].

Поверхность, относительно которой проводятся альтиметрические измерения, называется отсчетным эллипсоидом [134, 140, 141].

Альтиметр излучает радиолокационную волну и анализирует ответный сигнал, который отражается от поверхности. Высота поверхности — это разница между положением спутника на орбите относительно произвольной эталонной поверхности (центр Земли или грубое приближение поверхности Земли: эталонный эллипсоид) и дальности от спутника до поверхности (рассчитывается путем измерения времени для сигнала, чтобы совершить путь в оба конца). Помимо высоты поверхности, глядя на амплитуду и форму волны обратного сигнала, можно также измерить высоту волны и скорость ветра над крупными водными объектами, коэффициент обратного рассеяния и шероховатость поверхности для большинства поверхностей, от которых отражается сигнал.

Альтиметрические измерения проводятся вдоль подспутниковых трасс (треков), которые равномерно покрывают исследуемую область. Изомаршрутные программы предполагают повторяемость трасс в пределах ± 1 км через определенный цикл времени.

Существуют ряд архивов и баз данных о высотомерах (альтиметрах) (таблица 4.4), в данной работе использовались данные о высоте волны по данным RADS разработанной DEOS в рамках Нидерландского наблюдательного центра NETWOW NEONET [137, 142]. Отличительной особенностью RADS является наличие данных непосредственно над акваторией Каспийского моря.

Таблица 4.4 - Базы данных спутников альтиметров

Название	Данные/ продукты	Формат
OpenADB [136]	Высота поверхности моря, аномалий уровня моря, мгновенная динамическая топография океана, эмпирическая модель океанических приливов, вертикальное полное электронное содержание, адаптивный ретрекер подволны переднего фронта.	netcdf
RADS [137]	Аномалий уровня моря, значительная высота волны, коэффициент отражения, скорость ветра	ASCII
Aviso+ [138]	Аномалий уровня моря, значимая высота уровня моря, данные о ветре и волнений, и д.	netcdf
Podaac [139]	Данные о характеристиках океана, ледниках, океаническом волнении и др.	netcdf
STAR [109]	Значительная высота волны	png, jpeg

В диссертационной работе собрана база данных о значительной высоте волны со спутников с приборами альтиметрами или высотомерами: ERS-2, ENVISAT, TOPEX, Jason-1, Jason-2, Cryosat-2, Saral, Sentinal-3 за различные периоды их наблюдений (рисунок 4.4).

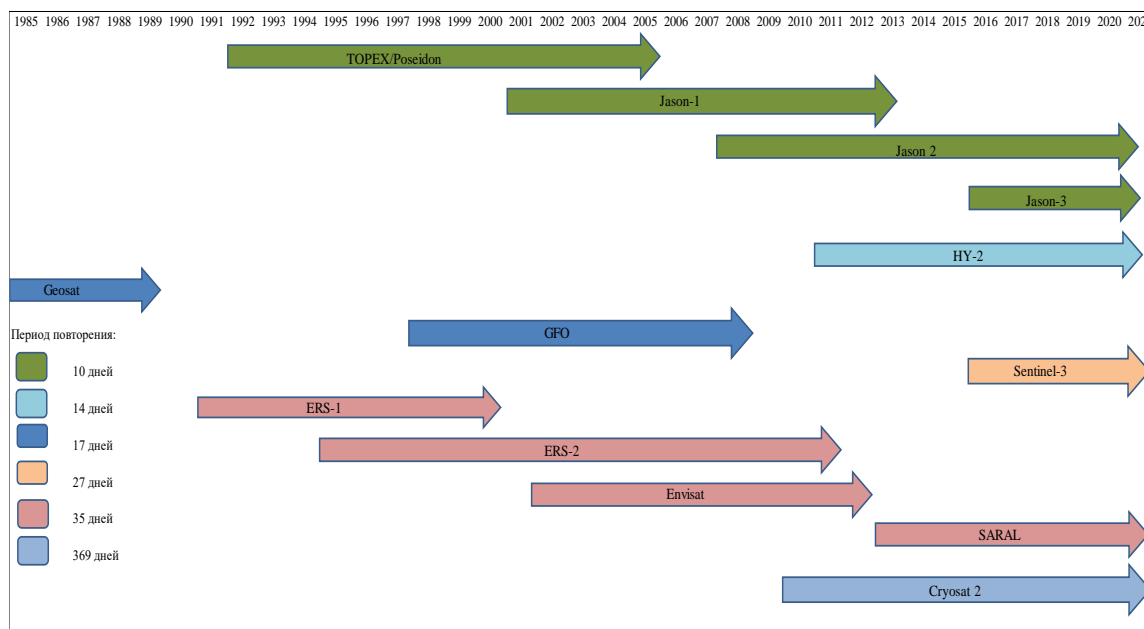


Рисунок 4.4 – Миссии спутников альтиметров

На рисунке 4.5 представлен график изменения среднего значения значительной высоты волны для акватории Каспийского моря за период 2002–2021 гг. Средняя высот волн за 2002-2021 гг. составила 1,31 м.

Наибольшие значения средней годовой высоты волны наблюдаются в период 2011-2015 гг., с максимальным средним значением в 1,75 м в 2011 г.

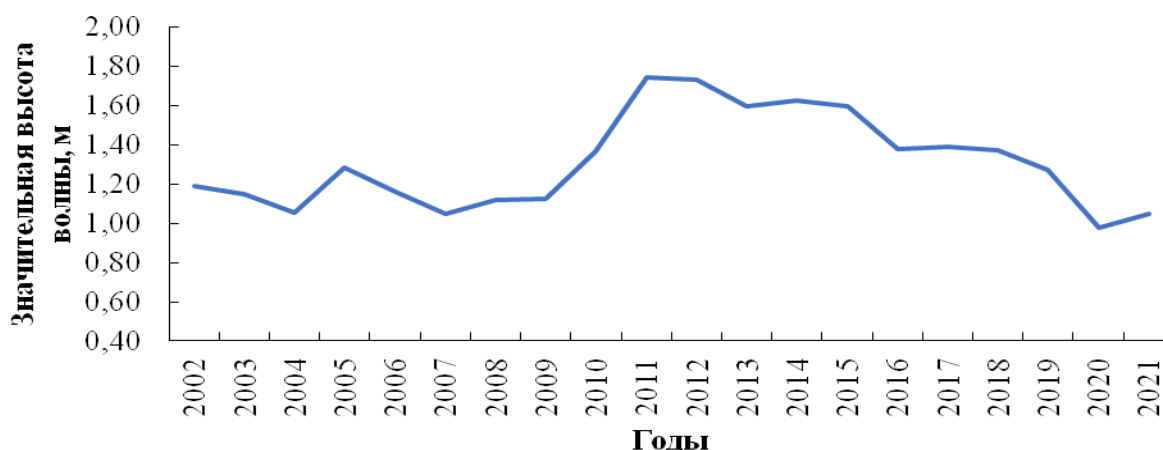


Рисунок 4.5 – График хода значительной высоты волны по данным альтиметров

Во внутригодовом распределении значительной высоты волны с 2002 г. по 2021 г. видно, что наибольшие значения наблюдаются в холодный период года (октябрь-март) (таблица В.8 Приложения В). Максимум в январе с постепенным понижением в мае-июле и дальнейшим ростом к декабрю. Так наибольшее среднее значение было наблюдаено в феврале 2012 г. равное 2,43 м.

По сезонам года средние значения значительной высоты волны была зимой – 1,56 м, весной – 1,21 м, летом – 1,14 м., осенью – 1,36 м.

Максимальные значения значительной высоты волны были: зимой 2,19 м, весной 1,86 м, летом 1,59 м, осенью 1,84 м.

Данные модели ECWAM.

В свою очередь ЕЦСПП с применением модели океанических волн ECWAM на основе реанализа ERA5 генерирует данные о волновых характеристиках. Модель океанских волн (ECWAM) описывает развитие и эволюцию поверхностных волн, создаваемых ветром, а также их высоту, направление и период [143142].

Модель связана с прогнозом атмосферы во всех конфигурациях (HRES, ENS, Extended Range, Seasonal) выпускаемых ЕЦСПП и динамической моделью океана NEMO.

Значительная высота волны данных реанализа представляет собой расстояние между впадиной и гребнем. Однако на поверхности океана сосуществует множество волн, и их распределение определяется спектром двумерных волн. Исходя из этого распределения, значительная высота волны определяется как умноженный на 4 квадратный корень из интеграла по частоте и направлению спектра волны. Можно показать, что она соответствует средней высоте одной трети самых высоких волн, обычно известной как $H^{1/3}$. Среднее направление волны — это спектрально

усредненное направление распространения волн (взвешенное по амплитуде) [143].

Значения характеристик ветрового волнения получены с Хранилища климатических данных (Climate Data Store) за период 1959–2021 гг. по ежечасным данным в формате netCDF за отдельные месяцы на основе реанализа ERA5 с пространственным разрешением $1^0 \times 1^0$.

Для всей акватории Каспийского моря изменения значений значительной высоты волны, среднего направления и периода волн при ветровом волнении во внутригодовом разрезе представлены на рисунках В.1-В.3 Приложения В.

На рисунке 4.6 представлены карты изменения средней высоты волны при ветровом волнении за 1959–2021 гг.

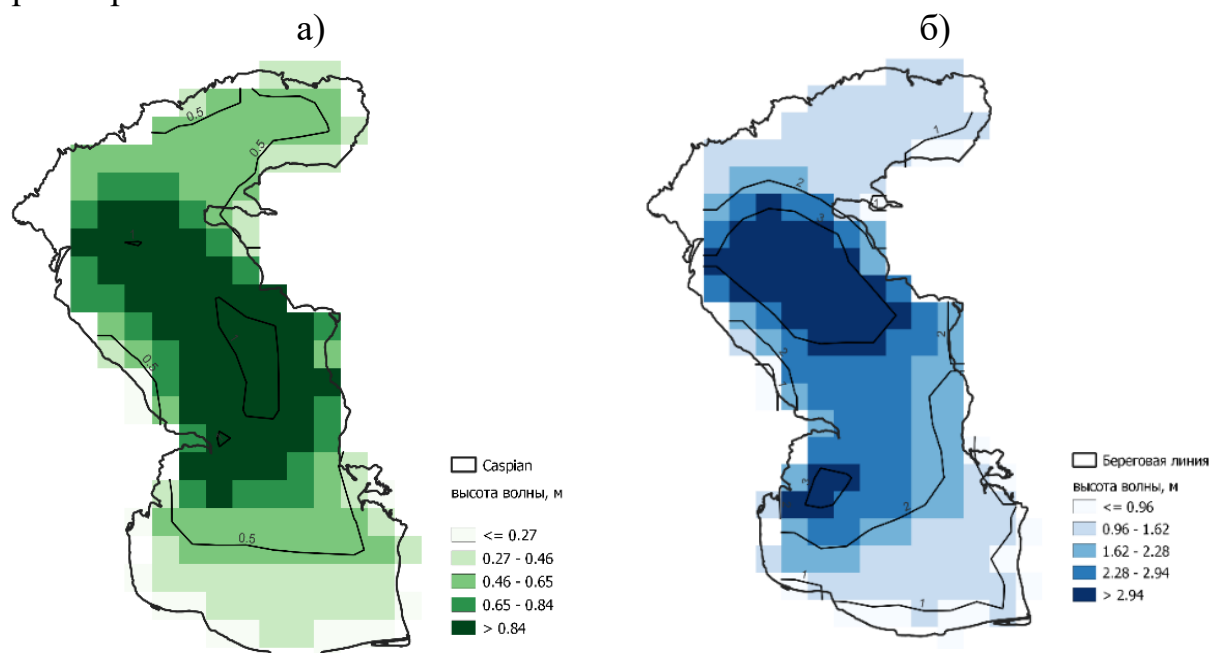


Рисунок 4.6 – Карты распределения значительной высоты волны на акватории Каспийского моря за 1959–2021 гг. а) средние, б) максимальные

Средние значения колебались в пределах 0,1–1,0 м, максимальные от 0,3 м до 3,6 м, минимальные 0,03-0,25 м. Наибольшие значения средней и максимальной высоты волны распределяются на открытой акваторий Среднего Каспия, охватывая всю казахстанскую часть восточного Каспия. Максимальные значения высоты волны отмечаются в марте (до 2,88 м), в декабре (до 2,59 м) и октябре (до 2,07 м). Наименьшее значение максимальной высоты волны отмечается в июле, равное 1,19 м.

По данным модели ЕСWAM в отдельных пунктах наблюдений в казахстанской части моря (рисунок 4.7) средняя высота волны за 1959-2021 гг. колебалась в пределах от 0,47 м (МГП Саура) до 0,85 м (МГП Курык и Песчаный), максимальные значения изменялись от 1,20 м (МГ Кулалы остров) до 2,51 м (МГП Курык и Песчаный).

Смоделированные моделью ЕСWAM данные о ветровом волнении на акватории Каспийского моря показывают, что преобладающим направлением

является юг, юго-восток и юго-запад (рисунок 4.8). Для казахстанского сектора моря также преобладающими направлениями ветрового волнения являются юг и юго-восток.

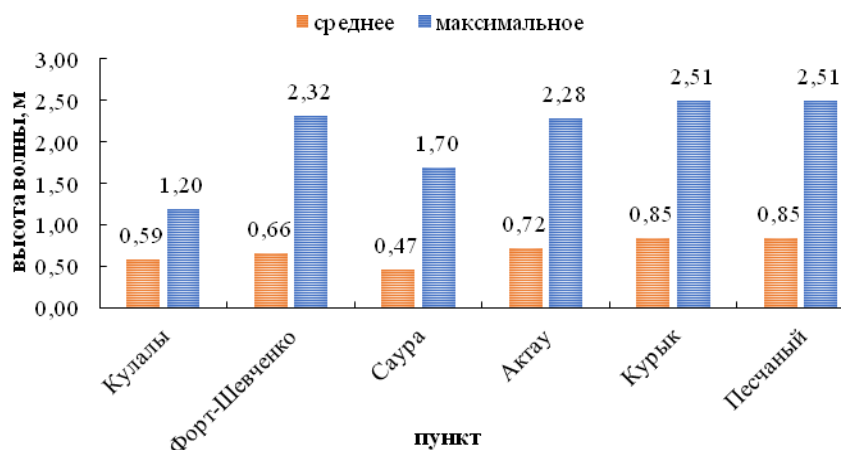


Рисунок 4.7 – Высота волны в отдельных пунктах наблюдений по данным ЕСWAM за 1959-2021 гг.

Во внутригодовом разрезе видно, что среднее направление ветрового волнения в казахстанской части в январе, апреле, ноябре – юго-восточное, в феврале, сентябре – юго-восточное и юго-западное, в марте – юго-восточное, восточное, мае – северо-восточное, восточное, юго-восточное, в июне – северо-восточное, восточное, июле – северо-восточное, южное, в августе – северо-восточное, северо-западное, юго-восточное, в октябре – юго-западное, западное, в декабре – южное.

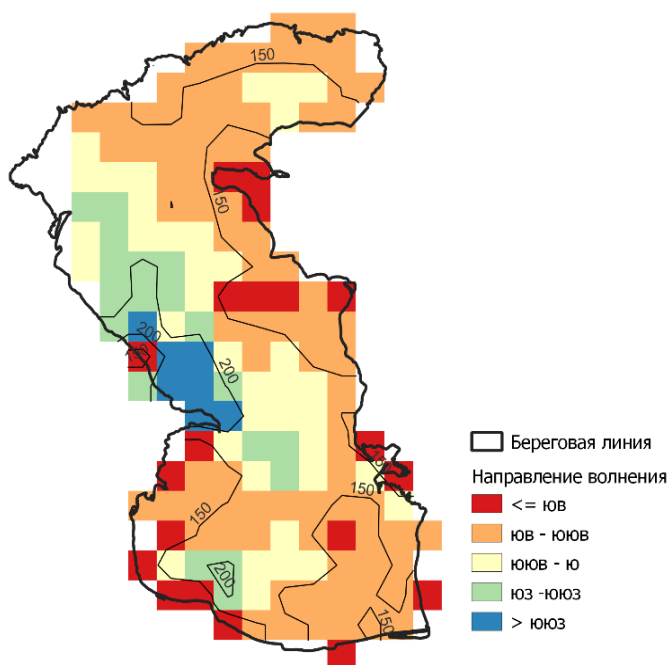


Рисунок 4.8 – Карты распределения преобладающего направления значительной высоты волны на акватории Каспийского моря за 1959–2021 гг.

Средний период ветрового волнения за 1959–2021 гг. был от 2,6 с до 4,0 с (рисунок 4.9), а максимальные значения в пределах 3–7 с, минимальные

в пределах 2-3 с. По расчетным данным модели ECWAM наибольшие значения среднего периода ветрового волнения были в марте, августе и декабре.

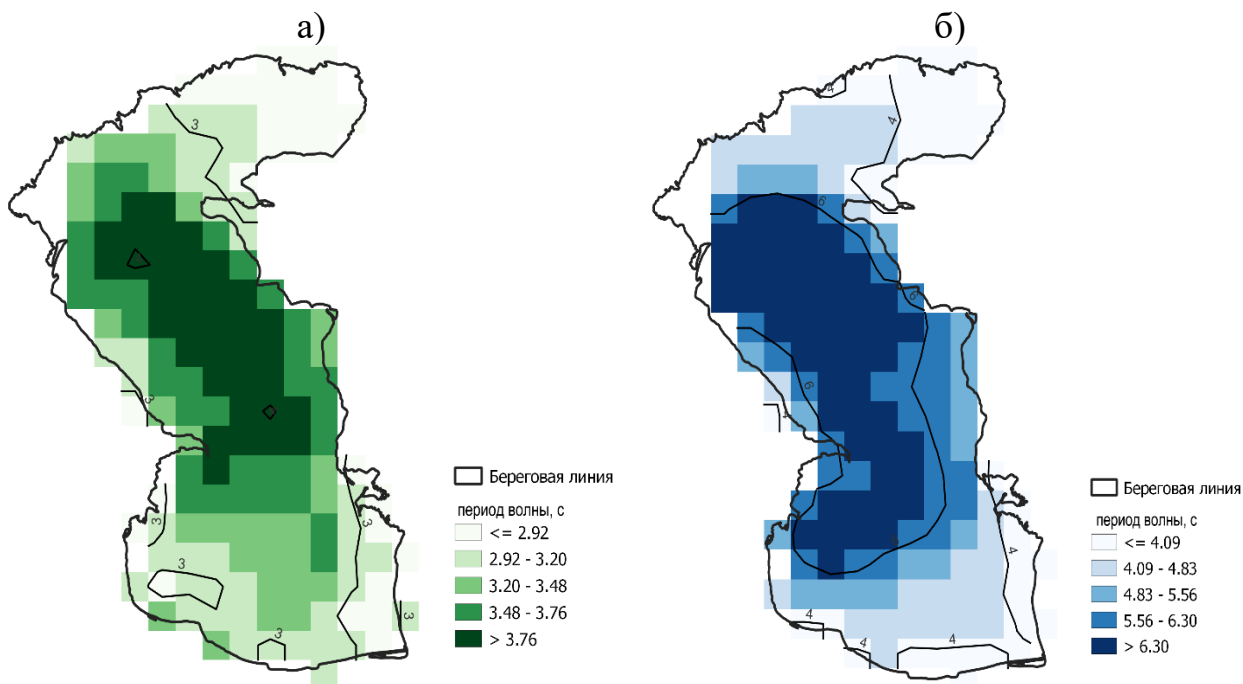


Рисунок 4.9 – Карты распределения периода волны на акватории Каспийского моря за 1959–2021 гг. а) средние, б) максимальные

Карты пространственно-временного распределения среднего периода волнения на акватории Каспийского моря по месяцам представлены на рисунках В.4-В.5 Приложения В.

4.3 Численное моделирование волнения на открытой акватории моря

Численное моделирование - создание математической модели движения/поведения изучаемого объекта/процесса/явления и дальнейшее её исследование с использованием численных методов или уравнений математической модели [144]. Численное моделирование относится к детерминированному виду математического метода моделирования процессов, когда каждому значению фактора соответствует определенное неслучайное значение результативного показателя [144, 145].

Существуют различные методы моделирования волнения, как простые эмпирические зависимости волн и ее изменения от влияния скорости ветра и продолжительности его воздействия, так и математические модели волнения [146, 147], в основе которых положена спектральная модель ветрового волнения третьего поколения WAM (Waves Modeling) и др. [148].

Существуют множество исследований посвящённых изучению волновых условий с применением математических моделей [149, 150, 151].

В настоящее время для расчета ветрового волнения на акватории Каспийского моря используются несколько вариантов волновых моделей, таких как WAM, SWAN, WAVEWATCH3 и др.

Модель SWAN с применением входных данных о ветре с Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды была адаптирована для акватории Каспийского моря, проведены сравнения с прогнозными данными Росгидромета и Турецкой Гидрометслужбы [152] для пункта Форт-Шевченко.

В настоящее время РГП «Казгидромет» выпускает прогнозы волнения с применением статистического метода (таблиц Бредшнейдера) для 5 районов к акваторий казахстанской части моря, а также консультативные прогнозы ветрового волнения на открытой акватории моря с заблаговременностью 5 суток с применением модели SWAN [153, 154, 155].

4.3.1 Общая характеристика спектральной волновой модели SWAN

Спектрально-волновая модель третьего поколения SWAN (Simulating Waves Nearshore) [156, 157] разработана Дельфтским технологическим университетом (Нидерланды) и находится в свободном доступе по адресу <http://www.swan.tudelft.nl>. Используется государственными органами, исследовательскими институтами и экспертами по всему миру.

Волны, которые создаются под влиянием ветра, имеют неравномерную высоту и период волны, вызванные неравномерностью характеристик ветра. Из-за этого невозможно применять детерминированный подход к описанию морской поверхности. В связи с этим в модели SWAN согласно теориям линейных волн, высоту поверхности моря достаточно хорошо описывает стационарный гауссовский процесс. Так высота поверхности моря в одной точке как функция времени может быть описана как (6),

$$\eta(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t + \alpha_i) \quad (6)$$

где, η - высота поверхности моря, a_i – амплитуда i -го компонента волны, σ_i – относительная частота в радианах или круговая частота i -го компонента волны в присутствии окружающего течения, α_i – случайная фаза i -го компонента волны [157, 156].

Модель учитывает нелинейные взаимодействия трех волн, характерных для закрытых и мелководных акватории, а также эффекты обрушения и дифракции волн на малых глубинах.

В ее основе лежит решение уравнения баланса энергии волнового поля в спектральном пространстве (7):

$$\frac{\delta N}{\delta t} + \frac{\delta c_x N}{\delta x} + \frac{\delta c_y N}{\delta y} + \frac{\delta c_\sigma N}{\delta \sigma} + \frac{\delta c_\theta N}{\delta \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (7)$$

где, N – удельная спектральная плотность, x, y – пространственные координаты, t – время, σ – волновая частота, θ – волновой угол, c_σ, c_θ – скорость распространения в спектральном пространстве, S_{tot} – функция источника, которая включает физические процессы как, генерацию волн за

счет энергий ветра, нелинейный перенос энергии волн при взаимодействии гармоник, уменьшение волн из-за образования пены и брызг, трения о дно и обращение волн на критической глубине [157].

В SWAN представлены следующие процессы, которые связаны с распространением волн:

- распространение в географическом пространстве;
- преломление из-за пространственных изменений дна и течений;
- дифракция;
- блокировка и отражение противоположными течениями;
- прохождение, блокировка или отражение волн из-за препятствий.

В модели представлены следующие процессы генерации и рассеяния волн:

- генерация ветром;
- диссипация из-за обрушения, которые может быть связано с изменением глубины;
- диссипация из-за трения о дно;
- нелинейное взаимодействие волн друг с другом;
- затухание волн из-за органики.

Источником волновой энергий является S_{tot} (8):

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (8)$$

где, S_{in} – вызванный ветром рост волны, S_{nl3} , S_{nl4} – перераспределение энергии за счет трехкомпонентного и четырехкомпонентного нелинейного волнового взаимодействия, $S_{ds,w}$ – диссипация энергии на гребне волны, $S_{ds,b}$ – диссипация через трение о дно, $S_{ds,br}$ – диссипация за счет обрушения волн в береговой зоне.

Так как, в SWAN единственным источником возникновения волн является передача ветровой энергии к морской поверхности S_{in} , то и генерация волн описывается двумя механизмами: резонансным и механизмом обратной связи.

После того, как волны были образованы, они начинают влиять на профиль ветра (и, следовательно, ход давления) в приповерхностном слое. Движение волн вверх и вниз, влечет за собой давление, которое, в свою очередь, сообщает дополнительную энергию волне. Этот процесс происходит экспоненциально во времени. Таким образом, рост волн под влиянием ветра в общем виде записывается, как сумма линейного и экспоненциального компонентов.

В модели значительная высота волны определяется, как (9):

$$H_s = 4\sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (9)$$

Преобладающее направление волнения, вычисляется по формуле (10):

$$DIR = 180/\pi \arctan \left(\frac{\int \sin\theta E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \cos\theta E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right) \quad (10)$$

Средний абсолютный период (в с) $E(\omega, \theta)$, определяемый как:

$$PER = 2\pi \left(\frac{\int \int \omega^{p-1} E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\int \int \omega^p E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \right) \quad (11)$$

Средняя длина волны, определяется, как (12)

$$WLEN = 2\pi \left(\frac{\int \int k^p E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \int k^{p-1} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right)^{-1} \quad (12)$$

где, $E(\omega, \theta, \sigma)$ – спектр плотности дисперсии, ω – абсолютная частота в радианах, k – число волны.

Основными входными параметрами модели SWAN являются батиметрия и характеристики ветра.

Качественные данные о батиметрии являются одним из важнейших условий для составления прогноза волнения. Первым шагом при адаптации модели является создание сетки с переменным разрешением. Существует ряд программ для создания сеток, содержащих треугольники, четырехугольники или комбинации различных типов сеток и на данный момент SWAN поддерживает три генератора сетки: **ADCIRC/SMS**, разработанный Исследовательской лабораторией моделирования окружающей среды [158, 159], **Triangle** разработанный Джонатаном Шевчуком, для генерации двумерной сетки посредством построения триангуляции Делоне [160] и **Easymesh** 2D-генератор на основе Делоне, разработанный Wojan Niceno [161].

В данной работе использована батиметрия GEBCO, впервые выпущенная в 1994 году Международной программой картирования морского дна [161, 162, 163]. Данные, выпущенные в мае 2020 года, охватывают весь земной шар с разрешением 15 угловых секунд, что соответствует 450 м. Для акватории Каспийского моря выполнено 2648 промеров глубин.

На рисунке 4.10 представлена схема действия при расчете ветрового волнения с применением модели SWAN. От качества полей ветра зависит результат моделирования волнения. В Каспийском море, в особенности в казахстанской части моря, только 10 морских гидрометеорологических станций и постов ведут наблюдения на прибрежной территории, а данные на открытой акватории моря отсутствуют. Для решения данной проблемы используются модельные данные о ветре – реанализы и прогнозные характеристики ветра высокого разрешения.

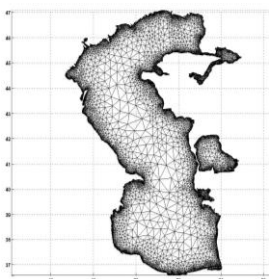
Модель имеет определенный формат ввода данных, так данные зонального и меридионального ветра должны располагаться друг за другом. В связи с этим, ветер, полученный с базы данных ЕЦСПП в формате netCDF, переформатирован с применением программы DHI.Generic.NetCDF.MIKE разработанной DHI. Программа дает возможность форматирования данных о ветре из netCDF в формат dfs2 или dfsu, которые с применением модели Mike Zero можно привести в формат ASCII.

Модель управляется с помощью настроек INPUT в файле кода запуска модели. При начале работы необходимо выбрать режимы расчета:

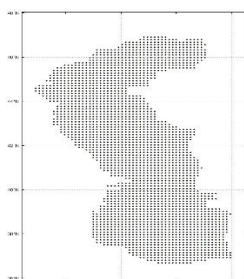
- GEN3 – модель работает в режиме третьего поколения для ввода данных о ветре;
- BREAKING - влиять на обрушение волны, вызванное глубиной, на мелководье;
- FRICTION – активация трения о дно;
- TRIADS - активация тройного взаимодействия волна-волна, используя либо метод LTA Эльдебержки, либо метод SPB Берк-Джирарда;
- DIFFRAC – в расчет волн включается дифракция.

Входные параметры:

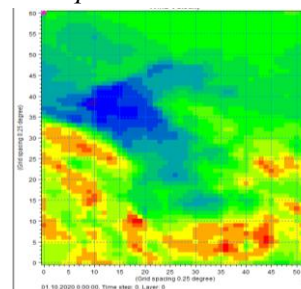
Триангуляционная сетка



Регулярная сетка



Ветер



Настройка кода запуска расчета:

Выбор проекции
Сферические координаты

Выбор времени
Дата начала. срок
через каждые n часов
Дата окончания. срок

Выбор режима
GEN3
BREAKING
FRICTION
TRIADS
DIFFRAC

Выбор области расчета
Регулярные/ Триангуляционные точки

Выгрузка результатов расчета:

В виде табличных данных

Название файла
выходные параметры
Дата начала.срок
через каждые n часов
Дата окончания.срок

```

$ Run: F31 Table: Caspy SWAN version: 41.10
$
$ Time Xp Yp Hsig
$ ( ) [deg] [deg] [m]
$
20230119.120000 51.348 36.6970 0.06870
20230119.120000 51.478 36.6970 0.08904
20230119.120000 51.609 36.6970 0.06748
20230119.120000 51.739 36.6970 0.02990
20230119.120000 51.870 36.6970 0.02910
20230119.120000 52.000 36.6970 0.03463
20230119.120000 52.130 36.6970 0.05587
20230119.120000 52.261 36.6970 0.06866
20230119.120000 52.391 36.6970 0.04733
20230119.120000 52.522 36.6970 0.09362
20230119.120000 50.957 36.8131 0.10675
20230119.120000 51.087 36.8131 0.13614
20230119.120000 51.217 36.8131 0.06762
20230119.120000 51.348 36.8131 0.05963
20230119.120000 51.478 36.8131 0.08264
20230119.120000 51.609 36.8131 0.06643
    
```

Визуализация результатов:

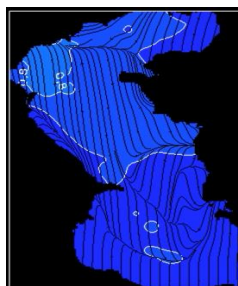
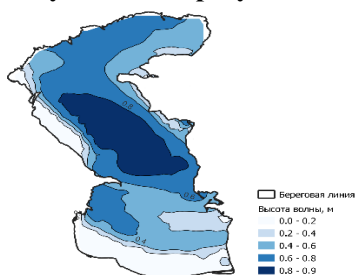


Рисунок 4.10 - Схема расчета ветрового волнения с применением модели SWAN

Выходные данные также контролируется конфигурационным файлом и могут выводиться как в виде полей, так и для конкретной точки или отрезка. В случае вывода полей есть возможность указать формат файла. Выходной файл может содержать такие величины как: дата и время (Time), координаты (Xp, Yp), высота значительных волн (Hsig), также можно рассчитывать направление распространения волны (Dir), период (Period), длина волны (Wlen), высота волн зыби (Hswell), средняя крутизна волны (Steepn), компоненты скорости ветра (X-Windv, Y-Windw) и др. представленные в таблице В.9 Приложения В.

4.3.2 Результаты численных экспериментов с использованием модели SWAN на открытой акватории моря

Расчеты волнения при стационарном ветре.

Проведены расчеты ветрового волнения при условиях стационарного состояния ветровых характеристик на море. Так, ветер будет постоянным, то есть в течение трех дней дует ветер одной скорости и направления, с параметрами ветра 5, 10, 15, 20 м/с и в 8 направлениях (север, северо-восток, восток, юго-восток, юг, юго-запад, запад, северо-запад) [104].

Карты изменения высоты волны по акватории моря представлены на рисунке В.6 Приложения В [104]. Для примера представлена карта пространственного распространения волнения при северо-восточном направлении ветра (рисунок 4.11).

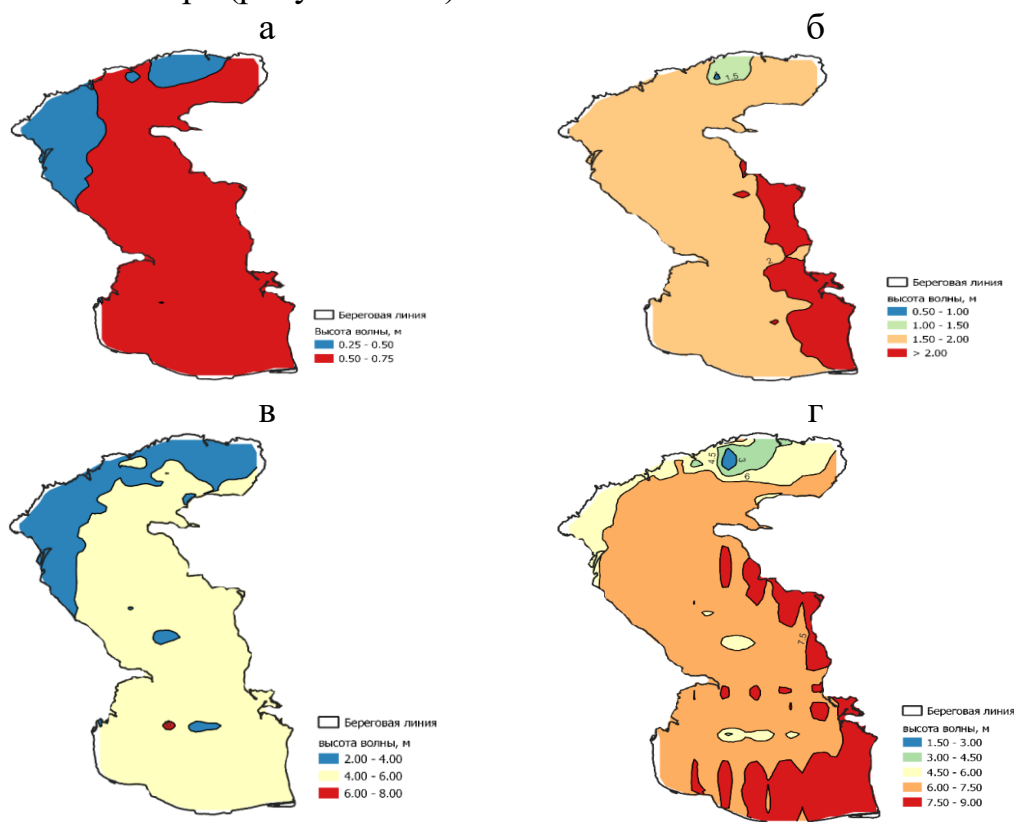


Рисунок 4.11 - Карты зонирования Каспийского моря по высоте волны при северо-восточном направлении ветра и скоростью а) 5 м/с, б) 10 м/с, в) 15 м/с, г) 20 м/с

Анализ показал, что при слабом ветре высота волны может достигать 1,2 метра при направлении ветра на северо-восток, юго-восток, юго-запад и северо-запад и наименьшее в западном направлении. При сильном ветре со скоростью 10 м/с максимальная высота волны в Среднем Каспии может достигать 3,5 м, а в северной части 1,2 м, в зависимости от глубины моря. При скорости ветра 15 м/с высота волн в казахской части Каспийского моря составляет от 2 м на севере до 7 м в Среднем Каспии.

Согласно результатам моделирования, максимальные высоты волн могут формироваться в Среднем Каспии при скоростях ветра 20 м/с северо-западного и юго-западного направления (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Расчетные величины высот волн при стационарных характеристиках ветра на акватории Каспийского моря

Направление ветра	Скорость ветра, м/с / Высота волны, м							
	5		10		15		20	
	мин	макс	мин	макс	мин	макс	мин	макс
Северо-восток	0,6	1,1	2,2	3,7	2,9	9,7	4,3	13,8
Восток	0,4	0,6	1,2	2,1	2,2	6,3	2,9	16,7
Юго-восток	0,7	1,6	1,6	3,6	3,1	11,1	4,3	22,7
Юг	0,3	0,6	0,9	2,1	1,5	4,7	2,1	8,3
Юго-запад	0,6	1,0	1,3	3,5	2,2	9,7	2,8	14,0
Запад	0,3	0,6	0,9	2,1	1,7	4,7	2,2	8,3
Северо-запад	0,8	2,5	1,5	4,1	3,2	13,2	4,7	14,6
Север	0,3	0,6	0,9	2,1	2,4	6,4	2,2	8,3

То есть, при устойчивом ветре со скоростью 20 м/с в течение трех суток по расчетам высота волны может достигать исключительных значений и колебаться от 8,3 м до 22,7 м на акватории моря в зависимости от направления ветра.

В свою очередь, возможное возникновение исключительных волн (превышение высоты волны 11 м) может привести к разрушительным последствиям на прибрежной части моря. Размытие и разрушение берегов, разрушение береговых сооружений, перемещение наносов и заполнение судоходных каналов и портовых акватории, влияние на навигацию, рыбный промысел и др. являются последствиями влияния высокого волнения на акваторию моря.

Расчеты для акватории Каспийского моря.

Расчеты для всей акватории Каспийского моря были проведены при применении входных параметров о ветре по ежечасным данным реанализа ERA5 за период 1959–2021 гг., так как в главе 3 были получены выводы, что данные реанализа ERA5 о скорости ветра имеют достаточно хорошую связь с наблюдаемыми на морских станциях и постах. Информация о непрерывном воздействии ветра при расчете характеристик волнения, представлялась в виде меридиональной (U) и зональной (V) компонент на высоте 10 м над уровнем моря. Временное разрешение данных составляло 1 ч, пространственное $0,25^0 \times 0,25^0$ по долготе и широте.

Перед началом расчетов сформированы файлы с входными данными и необходимыми для численного моделирования параметрами. Создана база данных ветрового волнения Каспийского моря за период 1959–2021 гг. Проведенные расчеты для 2648 точек на акватории Каспийского моря позволили получить смоделированные значения волновых параметров за каждый час: значительную высоту волны, средний период волны, среднее направление волнения и др. База данных состоит из 63 файлов в формате .dat. В каждом файле содержится информация за один год, порядка 24 млн. строк данных объемом 2,57 ГБ. В связи с этим, дальнейшие расчеты средних и максимальных, преобладающих значений проводились с применением программного обеспечения R-studio. Так, с помощью кода на языке программирования R (пример кода представлен на рисунке 4.12) были сделаны расчеты средних и максимальных значений значительной высоты волны для каждой расчетной точки за отдельные годы.

```
sub_df<-subset(df, Xp == "51.348" & Yp == "36.6970")
mean (as.numeric(sub_df$Hsig), na.rm = TRUE)
sub_df<-subset(df, Xp == "51.348" & Yp == "36.6970")
max (as.numeric(sub_df$Hsig), na.rm = TRUE)
sub_df<-subset(df, Xp == "51.348" & Yp == "36.6970")
distinct_A <- unique(sub_df$Dir)
matches <- match(sub_df, sub_df$Dir)
table_A <- tabulate(matches)
max_A <- which.max(table_A)
mode<-distinct_A[max_A]
```

Рисунок 4.12 – Пример кода для расчета статистических характеристик

В результате численных экспериментов получены ежечасные значения изменения высоты и направления волнения за период 1959-2021 гг. по 2648 точкам на акваторий Каспийского моря.

По результатам моделирования с применением модели SWAN за 1959–2021 гг. получено, что для акватории Каспийского моря средние значения высоты волны были около 0,4 м, с колебаниями от 0,3 м до 0,5 м, максимальные значения высоты волны колебались от 1,6 м до 3,2 м, со средним значением 2,0 м (рисунок 4.13).

Анализ ретроспективного периода показал, что в казахстанском секторе моря преобладает умеренное волнение (рисунок 4.12 б). Однако стоит отметить, что на большей части у восточного берега преобладало среднее волнение от 0,4 до 0,5 м. На северо-востоке было распространено волнение слабое и умеренное.

Анализ карты пространственного распределения показал, что максимальные высоты волн более 3 м наблюдались на стыке северо-восточной и восточной части Каспийского моря, и охватили район острова

Кулалы, Форт- Шевченко. То есть, в рассматриваемом районе моря было распространено сильное волнение.

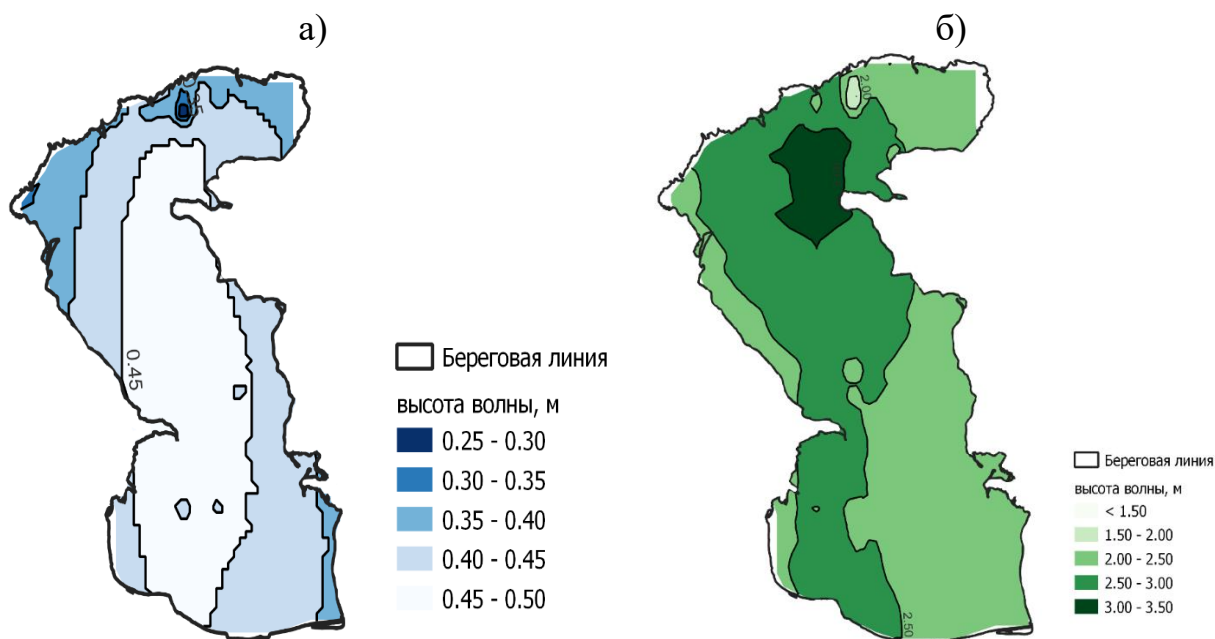


Рисунок 4.13 – Карта распределения а) средней, б) максимальной высоты волны в пространстве

Значения характеристик высоты волны для пунктов наблюдений в казахстанском секторе моря представлены на таблице 4.6, где видно, что средние значения составляют от 0,4 до 0,5 м, максимальные от 2,7 м до 3,2 м.

Таблица 4.6 – Значения высоты волны для Каспийского моря

пункт	Высота волны, м	
	среднее	максимальная
МГ Кулалы остров	0,46	3,05
МГ Форт-Шевченко	0,47	3,05
МГП Саура	0,46	2,90
МГ Актау	0,45	2,70
МГП Курык	0,46	2,80
МГП Песчаный	0,46	2,72
МГП Фетисово	0,42	2,28
По акватории	0,44	3,19

Как видно на графике 4.14 средние высоты волн, как по акватории, так и по пунктам наблюдений находятся в пределах 0,3-0,5 м, с наибольшими подъемами в 1985 г. от 0,8 м (Фетисово) до 1,1 м (Форт-Шевченко), в 1991 г. от 0,4 (Фетисово) до 0,7 м (Кулалы), в 2016 г. от 0,7 м (Фетисово) до 1,1 м (Курык).

Здесь также, можно отметить, что в декабре 1985 году на прибрежной станции Актау было наблюдено волнение северо-западного направления высотой 4,5 м, а в январе 1991 г. волнение западного направления с высотой 3,5 м.

Как видно на рисунке 4.15 максимальные высоты по акватории моря были выше, чем в отдельных пунктах у казахстанского сектора Каспийского моря.

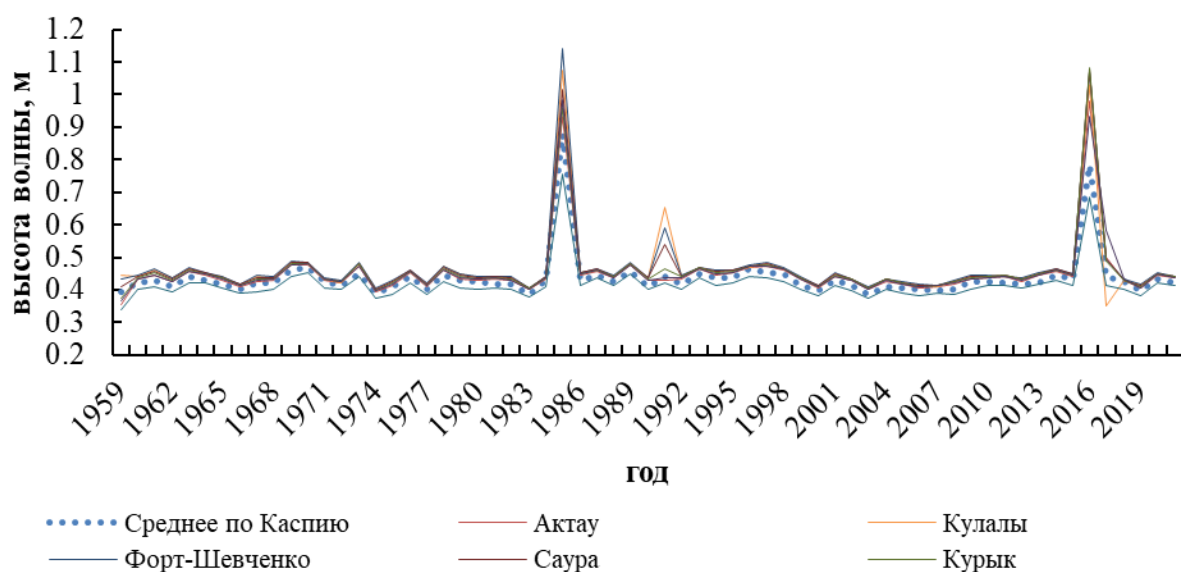


Рисунок 4.14 – График хода изменения средней высоты волны по пунктам наблюдения за период 1959–2021 гг.

Распределение средней высоты волны по месяцам показало (таблица 4.7, рисунок В.7 Приложения В), что наибольшие высоты волн были в холодный период года (январь-март). Так средние значения в этот период были около 0,32, а максимальные более 1 м.

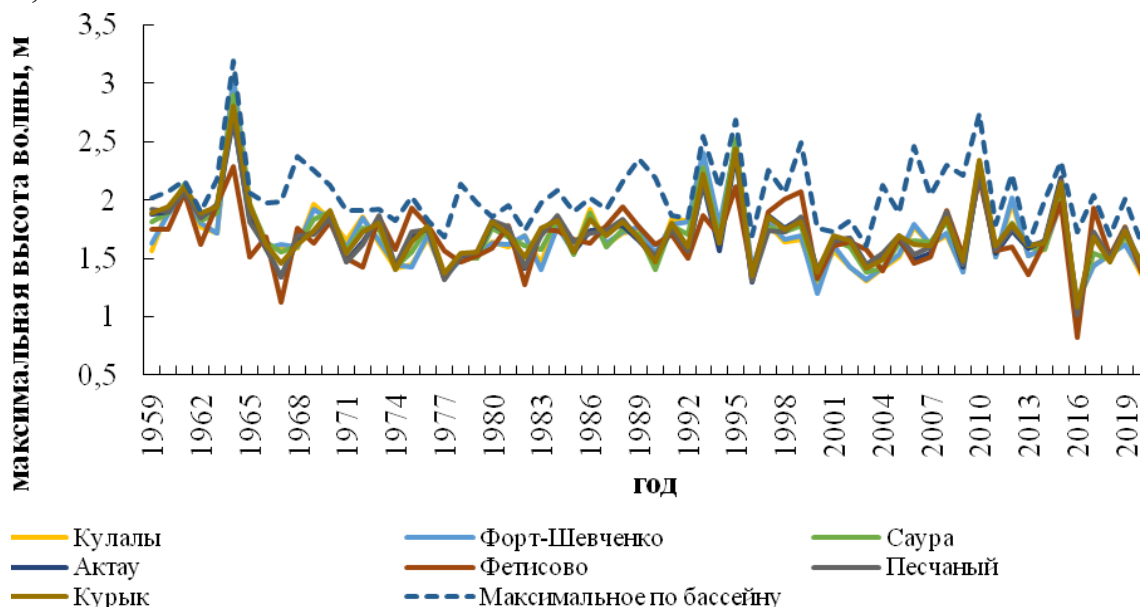


Рисунок 4.15 – График хода изменения максимальной высоты волны по акватории Каспийского мор за период 1959–2021 гг.

Распределение максимальной высоты волны по акватории Каспийского моря по месяцам показало, что наибольшие значения были в январе (таблица 4.7, рисунок В.8 Приложения В).

В целом в казахстанском секторе Каспийского моря наблюдается сильное волнение.

Однако, стоит отметить, что за период 1959–2021 гг. из общего количества рассчитанных ежечасных высот волн на акватории в 104416 случаях высота волны превышала 2 м. На период 1959–1989 гг. приходится 25% случаев превышения высоты волны 2 м, а на период 1990–2021 гг. 76%. В 1995 г., 2010 г., 1964 г., 1993 г. отмечалось наибольшее количество волнения с высотой больше 2 м, 27906, 19284, 18557, 11538 случаев соответственно (Таблица В.10 Приложения В).

Таблица 4.7 – Значения высоты волны по месяцам для Каспийского моря,

месяц	Средняя высота волны, м		Максимальная высота волны, м	
	наименьшее	наибольшее	наименьшее	наибольшее
Январь	0,32	0,56	1,50	3,19
Февраль	0,33	0,58	1,14	2,74
Март	0,31	0,55	1,11	2,68
Апрель	0,27	0,49	1,06	2,33
Май	0,24	0,42	0,93	1,80
Июнь	0,23	0,41	0,76	1,74
Июль	0,22	0,41	0,80	1,67
Август	0,23	0,43	0,73	1,67
Сентябрь	0,25	0,48	0,80	1,98
Октябрь	0,27	0,49	1,02	2,04
Ноябрь	0,29	0,52	1,08	2,55
Декабрь	0,30	0,54	0,95	1,94

В отдельных пунктах казахстанской части Каспийского моря случаи с превышением высоты волны 2 м отмечалось не часто, так в 1961 г. 3-4 случая, 1964 г. 11-15 случаев, 1993 г. 4-10 случаев, 1995 г. 9-16 случаев, 2010 г. 8-11 случаев, в 2012 г. 1 случай, в 2015 г. по 4 случая в среднем (Таблица В.10 Приложения В).

Полученные результаты хорошо согласуются с волновым климатом, описанным в ряде литератур [2, 72, 164], однако расчетные значения средней высоты волны занижены по сравнению с наблюдаемыми данными, что может быть связано с погрешностью данных реанализа о ветровом режиме.

Для уточнения характеристик волнения произведен расчет высоты волны различной обеспеченности с использованием результатов моделирования за период 1959–2021 гг. В таблице В.11 приложения В приведены параметры биноминальных асимметричных кривых обеспеченностей средней высоты волны.

Среднеквадратические ошибки расчетов коэффициента вариации (σ_{C_v}) и коэффициента асимметрии (σ_{C_s}) находятся в допустимых пределах, поэтому вычисленные значения приняты для дальнейших расчетов эмпирических кривых обеспеченности. Так σ_{C_v} был от 9,08 % до 9,41 %, а σ_{C_s} около 3,09 %. Средняя высота волны редкой повторяемости 0,1 % для всех рассматриваемых пунктов наблюдений составила от 1,56 м (Форт-Шевченко) до 0,94 м (Фетисово), в свою очередь высота волны 1 %

обеспеченности составила от 1,01 м (Форт-Шевченко) до 0,68 (Фетисово) (таблица В.11 Приложения В).

Параметры биномиальных асимметричных кривых обеспеченностей максимальной высоты волны (таблица В.12 Приложения В) по результатам моделирования за 1959–2021 гг. показали, что максимальные высоты волн при 0,1 % обеспеченности составили 3,45 м, 1 % обеспеченности 2,77 м у Форт-Шевченко.

Расчетные величины высоты волны удовлетворительно согласуются с наблюдаемыми данными на прибрежной акватории, в связи с этим проведен анализ сравнения результатов двух рассматриваемых в данной работе моделей (ECWAM и SWAN).

График сравнения (рисунок 4.16) изменения средней высоты волны по акватории моря за 1959–2021 гг. по данным модели ECWAM и смоделированным с применением модели SWAN показал, что разница между ними составляет от 0,05 м до 0,55 м. Наибольшая разница прослеживается в марте, октябре и декабре.

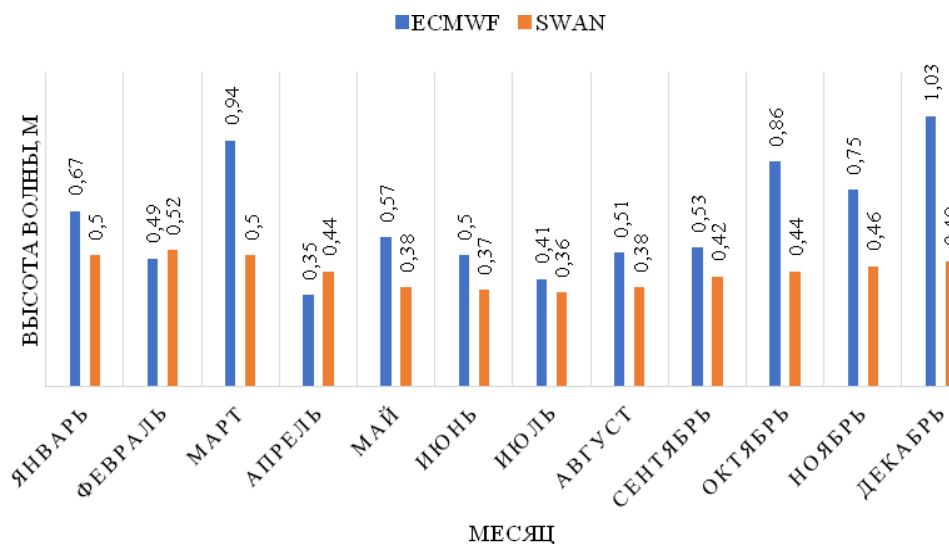


Рисунок 4.16 – График средней высоты волны на акватории Каспийского моря за 1959–2021 гг. по данным моделей ECWAM, SWAN

Сравнение значений высоты волны по пунктам наблюдений показало, что для среднего волнения разница между данным составляла от 0,01 м до 0,39 м, а для максимального значения от 0,21 м до 1,86 м. Наибольшая разница прослеживается у МГ Кулалы, остров.

Во внутригодовом разрезе разница для МГ Кулалы, остров составила до 0,3 м (ноябрь), МГ Форт-Шевченко 0,4 м (ноябрь), МГП Саура 0,4 м (август, март), в МГ Актау до 0,6 м (март), до 0,9 м в марте у МГП Курык и МГП Песчаный.

В целом данные имеют между собой неплохую связь, коэффициенты корреляции более 0,5. Применение численного моделирования и данных ДЗЗ дает возможность описать режим волнения на акватории Каспийского моря.

Смоделированные преобладающие направления волнения за период 1959-2021 гг. показали, что наиболее часто в казахстанском секторе Каспийского моря наблюдались направления юго-восточные, южные, юго-западные (рисунок 4.17).

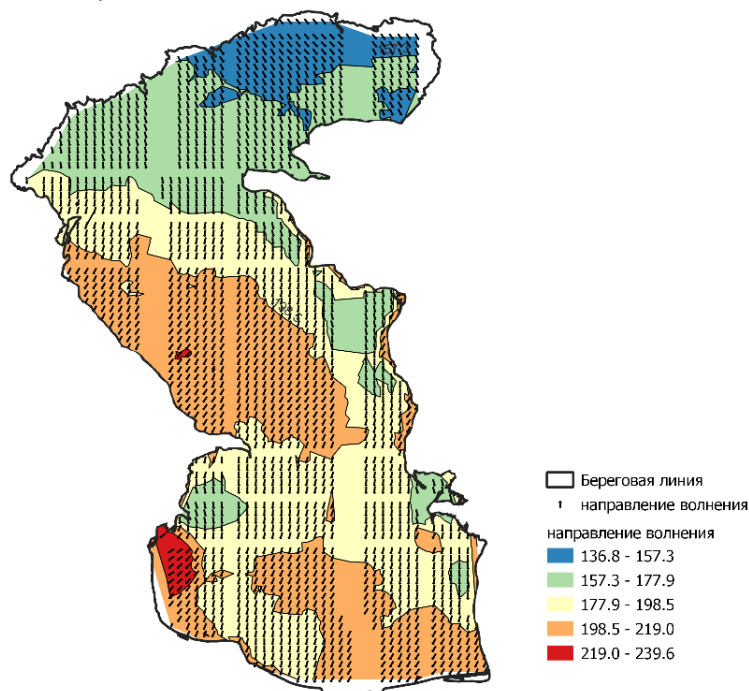


Рисунок 4.17– Смоделированные значения преобладающего направления ветрового волнения за 1959-2021 гг.

Во внутригодовом распределений преобладающего направления ветрового волнения не было однонаправленных трендов, так по месяцам: январь – северо-восточное, юго-восточное и юго западное; февраль, март, июль, август, ноябрь и декабрь – юго-восточное, южное, юго-западное; апрель – юго-восточное, южное, юго-западное, западное; май, июнь, сентябрь – юго-восточное, южное; октябрь – юго-западное, южное (рисунок В.9 Приложения В).

Расчеты для порта Актау.

Каспийское море, являясь крупным водным объектом, омывающим берега пяти стран, дает возможность развитию международных транспортных перевозок сухих грузов, нефтепродуктов и т. д. посредством судоходства на море, в том числе через морские порты, расположенные в казахстанском секторе Каспийского моря, как Актауский морской торговый порт, порт Баутино и Курык [165, 166].

В связи с этим изучение характеристик волнения на прибрежные сооружения и судоходство близ морских портов является важной задачей данной работы.

Проведены расчеты высоты и направления волнения у порта Актау с использованием ветровых характеристик Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды Ensemble Forecast Systems с разрешением $0,25^\circ$ на $0,25^\circ$. Параметры волнения в Актау моделировались за период с 1

января 2018 года по 30 декабря 2019 года за каждые 3 часа, в связи с тем, что данный период наиболее охвачен спутниковыми данными альтиметров [167, 168].

Скорость ветра, наблюдаемая на станции МГ Актау и данные ЕЦСПП имеют аналогичные изменения в течение года, но наблюдаемая скорость ветра на станции в среднем в 1–1,5 раза меньше рассчитанной ЕЦСПП. Это можно объяснить расположением наблюдательной сети на берегу моря и воздействием внешних физических факторов местности.

Анализ смоделированных значений параметров волнения показал, что максимальная высота волн, превышающая 3 м, была зафиксирована в 6 случаях в 2018–2019 гг. при направлении волн на северо-запад и юго-восток. 14 декабря 2018 г. в 06.00 при скорости ветра 15 м/с наибольшая высота волны достигла 4,63 м, период волны 8 с, средняя длина волны 65,37 м, средний уклон волны 0,05 [168].

Сравнение смоделированных периодов волн с фактическими их значениями не производилось, так как отсутствуют инструментальные наблюдения. По модели средний период волны составляет 3 с, максимальное значение – 26 с. Поскольку наибольшие значения высоты волн были в 2018 г., проведен анализ сезонных изменений параметров волнения (таблица 4.10). В течение 2018 года более высокие значения средней высоты волн были в зимние месяцы, так, в декабре среднее значение составило 1,11 м, максимальное – 3,79 м, а в феврале они составили в среднем 0,93 м, максимальное – 2,25 м. Летом 2018 г. значительные высоты волн в среднем достигали 0,62 м, а максимальные – 1,95 м, при этом средний период составлял 3 с [168].

За расчетный период (2018–2019 гг.) наибольшую повторяемость имеют высоты волн от 0,25 до 0,75 м (46,1 %), а наименьшую волнения высотой более 3,5 м (0,1 %). Преобладающими направлением является юго-восточное и северо-западное для расчетных, и юго-восточное и северо-восточное для наблюдаемых характеристик ветрового волнения (рисунок 4.18) [168].

Таблица 4.10 - Параметры волнения у Актау по сезонам в 2018 г.

Параметры		Зима	Весна	Лето	Осень
Среднее	Высота волны, м	1,01	0,80	0,62	0,91
	Период волны, сек	4	3	3	4
	Длина волны, м	19,0	15,6	12,1	17,3
	Крутизна	0,06	0,05	0,05	0,05
Максимум	Высота волны, м	3,8	2,4	2,0	2,6
	Период волны, сек	7	6	5	6
	Длина волны, м	65,4	46,8	34,7	59,9
	Крутизна	0,09	0,09	0,09	0,08

Так, как наблюдение за волнением на МГ Актау осуществляется визуально, проведено сравнение смоделированных значений со спутниковыми наблюдениями за морем, в данном случае с данными альтиметрии. За исследуемый период за объектом исследования производили наблюдения спутники Cryosat 2, Jason 3, Sentinel 3A. В среднем каждый спутник производил наблюдения 3 раза в месяц, то есть 3 разных прохода по

акватории, за 2018–2019 годы, охват спутниковыми данными 197 дней в году. Результаты сравнения показали, коэффициент корреляции между смоделированными значениями и с данными Sentinel-3 составил более 0,8, со спутником Jason-3–0,70, Cryosat - 0,41. Средняя квадратическая ошибка составила для Sentinel-3–0,44, Jason-3 - 0,45, Cryosat - 0,63, стандартное отклонение - 0,65, 0,54, 0,57 соответственно [168, 169, 170].

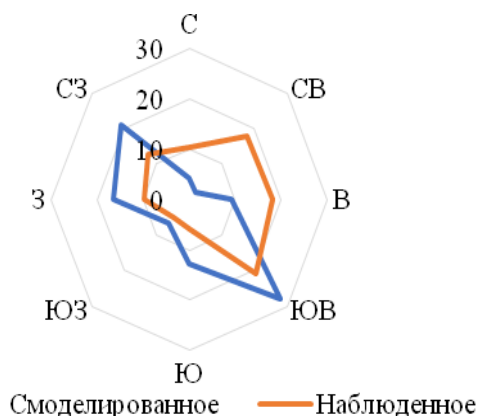


Рисунок 4.18 – Наблюдаемые и смоделированные направления волн у МГ Актау за 2018–2019 гг.

На рисунке 4.19 представлены графики сравнения смоделированной высоты волны с данными спутника альтиметра Sentinel 3А.

В целом можно сделать вывод, что качество воспроизведения смоделированных данных соответствует современным реализациям волновых моделей и имеет достаточно высокую связь [168, 169, 170].

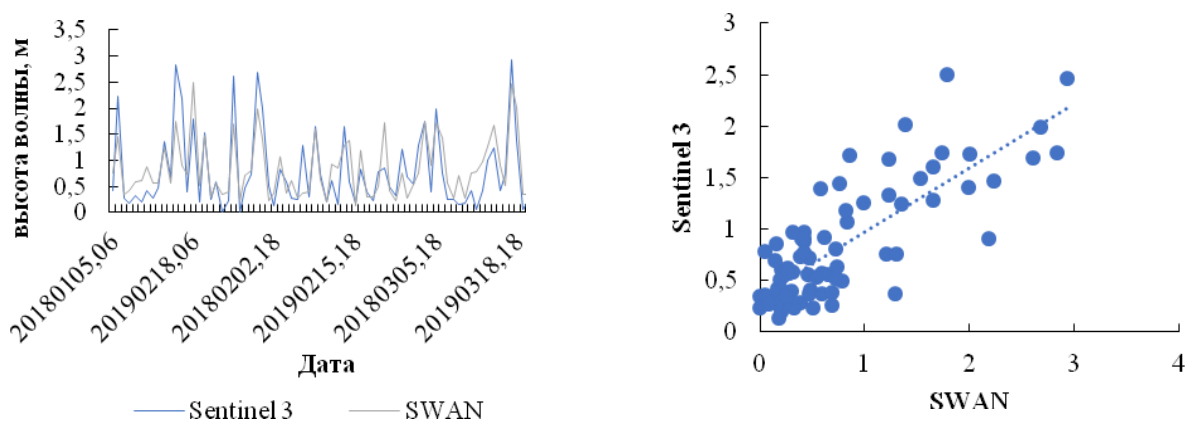


Рисунок 4.19 – Графики сравнения и связи высоты волны по данным Sentinel-3А и смоделированными значениями

Проекция высоты волны на будущее.

Проекция высоты волны на будущее на основе климатических данных необходима для определения направления развития прибрежных районов и адаптации существующей инфраструктуры для смягчения воздействия опасных явлений на море [171].

В связи с необходимостью оценки изменения высоты волны в будущем, и опереждения необходимости построения новых гидротехнических сооружений на прибрежной акваторий Каспийского моря были проведены расчеты проекции высоты волны на будущее до 2050 г. для акватории Каспийского моря с использованием модели SWAN при применении средне-суточных скоростей ветра по данным климатических моделей набора данных NEX-GDDP-CMIP6 состоящего из глобальных климатических сценариев с уменьшенным масштабом (разрешение данных $0,25^\circ$ на $0,25^\circ$), полученных в результате прогонов модели общей циркуляции, проведенных в рамках Шестой фазы (CMIP6) проекта взаимного сравнения связанных моделей, и двух из четырех сценариев выбросов парниковых газов (SSP1.26 и SSP5.85) известные как общие социально-экономические пути (SSP) [172].

Цель этого набора данных состоит в том, чтобы предоставить набор глобальных проекций изменения климата с высоким разрешением и скорректированными погрешностями, которые можно использовать для оценки воздействия изменения климата на процессы, чувствительные к более мелкомасштабным климатическим градиентам и влиянию местной топографии на климат.

В моделировании CMIP6 используются два основных типа моделей, которые различаются по обработке природных концентраций CO_2 :

1) Модели системы Земли (ESM) учитывают потоки CO_2 между атмосферой, океаном и биосферой.

2) В моделях климата (КМ, также известных как модели общей циркуляции атмосферы и океана, МОЦАО) изменения концентрации CO_2 заданы и не могут меняться в ответ на изменение климата.

В обоих типах предусмотрены антропогенные источники CO_2 и других парниковых газов (ПГ) [172].

Из общего набора данных NEX-GDDP-CMIP6 состоящего из 35 моделей, для оценки изменения скорости ветра и дальнейшего его применения для расчетов ветрового волнения были отобраны 27 моделей, которые состоят из средне-суточных данных за 365/366 дней в году для двух сценариев SSP1.26 и SSP5.85 для акватории Каспийского моря (таблица 4.11).

Сравнение данных моделей CMIP6 с фактическими данными о среднесуточной скорости ветра на станциях и постах на побережье Каспийского моря за исторический период с 1995 по 2014 гг. показало, что среднегодовые значения скоростей ветра по моделям находятся в близких пределах с фактическими данными.

Расчет ветрового волнения за исторический период (1995–2014 гг.) с использованием данных 27 моделей CMIP6 проведен для пунктов, расположенных в казахстанской части моря (Кулалы остров, Форт-Шевченко, Актау).

Средняя высота волны за исторический период (1995-2014 гг.) составила для МГ Кулалы остров от 0,56 м (ACCESS-ESM1-5) до 1,11 м (CESM2), для МГ Форт-Шевченко от 0,58 м (ACCESS-ESM1-5) до 1,11 м (CESM2, EC-Earth3), для МГ Актау от 0,58 м (ACCESS-ESM1-5) до 1,19 м (NorESM2-MM, EC-Earth3). На рисунке 4.20 представлен график сравнения средней высоты волны по фактическим данным и расчетным данным с применением данных реанализа ERA5 и моделей CMIP6, где видно, что фактические и расчетные с применением данных реанализа ERA5 ниже, чем расчетные с применением моделей CMIP6.

Таблица 4.11 – Описание моделей CMIP6

№	Название модели	Центр моделирования, страна	Горизонтальное разрешение
1	TaiESM1	AS-RCEC (Taiwan)	0.9x1.25
2	NorESM2-MM	NorESM (Norway)	1.25°x 0.942°
3	NorESM2-LM	NorESM (Norway)	2.5°x 1.895°
4	NESM3	NUIST (China)	1.875°x 1.865°
5	MPI-ESM2-0	MRI (Japan)	1.125°x 1.121°
6	MPI-ESM1-2-LR	MPI (Germany)	1.875°x 1.865°
7	MPI-ESM1-2-HR	MPI (Germany)	0.9375°x 0.935°
8	MIROC6	MRI (Japan)	1.4°x 1.4°
9	MIROC-ES2L	MRI (Japan)	2.8125°x 2.79°
10	KIOST-ESM	KIOST (Republic of Korea)	2.2 x 2.2
11	IPSL-CM6A-LR	IPSL (France)	2.5°x 1.27°
12	INM-CM5-0	INM (Russia)	1.5 x 2.0
13	INM-CM4-8	INM (Russia)	1.5 x 2.0
14	GISS-E2-1-G	GISS (USA)	2.0° x 2.5°
15	GFDL-ESM4	NOAA	1.0 x 1.3
16	FGOALS-g3	CAS (China)	2.3 x 2.0
17	EC-Earth3-Veg-LR	EC-EARTH (Netherlands/Ireland)	0.7 x 0.7
18	EC-Earth3	EC-EARTH (Netherlands/Ireland)	0.7 x 0.7
19	CanESM5	CCCma (Canada)	2.8125°x 2.79°
20	CNRM-ESM2-1	CNRM (France)	1.4 x 1.4
21	CNRM-CM6-1	CNRM (France)	1.4°x 1.4°
22	CMCC-ESM2-1	CNRM (France)	1.4 x 1.4
23	CESM2	NCAR (USA)	1.25°x 0.94°
24	BCC-CSM2-MR	BCC (China)	2.8 x 2.8
25	ACCESS-ESM1-5	Beijing Climate Center	1.2 x 1.8
26	ACCESS-CM2	CSIRO (Australia)	1.25°x 1.875°
27	CMCC-CM2-SR5	CMCC (Italy)	1.25°x 0.94°

Стоит отметить, что несмотря на разницу в значениях средней высоты волны между наблюдаемыми данными и рассчитанными с применением данных моделей CMIP6, коэффициенты корреляции для рассматриваемых пунктов наблюдений были как отрицательно, так и положительно направленные, однако достаточно высокие.

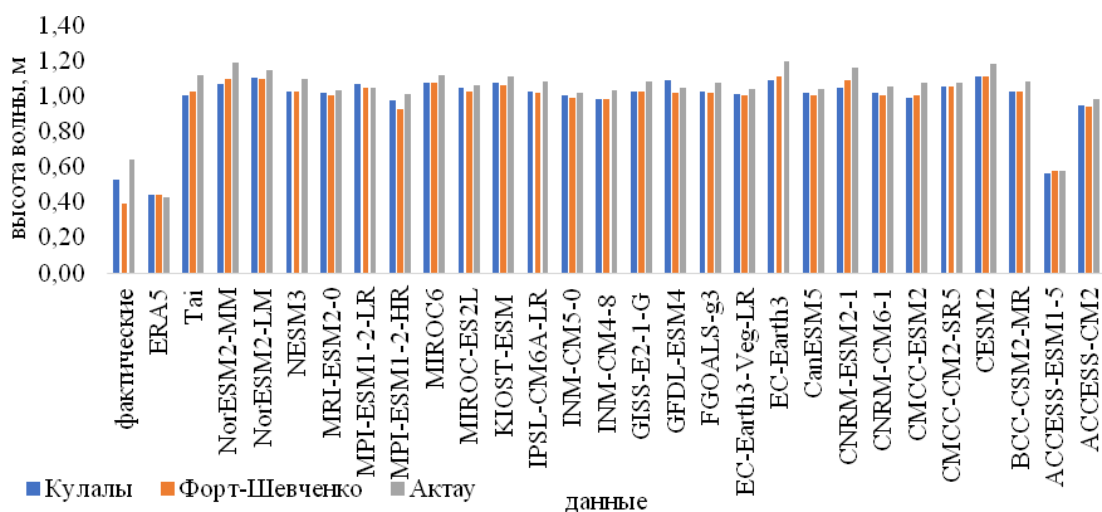


Рисунок 4.20 – График фактической и расчетной средней высоты волны за период 1995–2014 гг.

Так, для МГ Кулалы острова, МГ Форт-Шевченко, МГ Актау соответственно составили от -0,8 до 0,9, от -0,7 до 0,7, от -0,9 до 0,8 при сравнении с фактическими данными и от -0,7 до 0,8, от -0,8 до 0,7, от -0,8 до 0,7 при сравнении с расчетными величинами реанализа ERA5 (таблица В.13 Приложения В).

Максимальная высота волны за исторический период (1995–2014 гг.) составила для МГ Кулалы остров от 2,24 м (ACCESS-CM2) до 3,20 м (EC-Earth3, CMCC-ESM2), для МГ Форт-Шевченко от 2,29 м (ACCESS-CM2) до 3,53 м (EC-Earth3), для МГ Актау от 2,47 м (INM-CM4-8) до 4,59 м (EC-Earth3). На рисунке 4.21 представлен график сравнения максимальной высоты волны по фактическим данным и расчетным данным с применением данных реанализа ERA5 и моделей CMIP6.

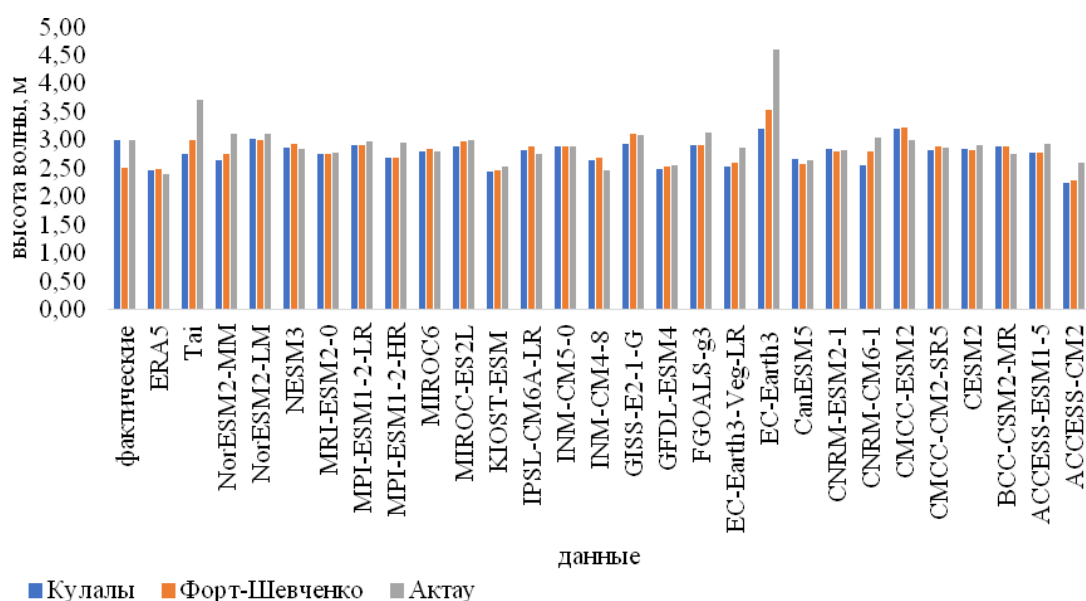


Рисунок 4.21 - График фактической и расчетной максимальной высоты волны за период 1995–2014 гг.

Коэффициенты корреляции связи между фактическими и расчетными значениями при применении данных моделей CMIP6 колебались в одинаковых пределах для рассматриваемых пунктов, так для МГ Кулалы, остров и МГ Актау составили от -0,8 до 0,8, для МГ Форт-Шевченко от -0,9 до 0,8 (таблица В.13 Приложения В).

Проанализировав тесноту связи между наблюдаемыми и расчетными значениями высоты волны, можно сказать, что из 27 рассматриваемых моделей наиболее высокую связь с фактическими данными имеют 13: ACCESS-ESM1-5, BCC-CSM2-MR, CESM2, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg-LR, INM-CM4-8, KIOST-ESM, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, NESM3.

Данные этих моделей были проверены на точность или применимость посредством расчета статистических критериев как,

1) средняя абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |X - Y| \quad (13)$$

2) среднеквадратическая ошибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X - Y)^2} \quad (14)$$

3) коэффициент эффективности:

$$E = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (15)$$

4) индекс согласия:

$$d = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2 + \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

Результаты оценки применимости данных средней высоты волны, согласно статистическим критериям, показало (Рисунок В.10 Приложения В), что по критериям наиболее применимыми моделями являются CNRM-ESM2-1, INM-CM4-8 так, как:

- значения MAE от 0,4 м до 0,8 м с наименьшие значения по данным моделей ACCESS-ESM1-5, CNRM-ESM2-1, INM-CM4-8;

- значения RMSE были в пределах от 0,5 м до 0,9 м, наименьшие значения наблюдались для моделей ACCESS-ESM1-5, BCC-CSM2-MR, CNRM-ESM2-1, KIOST-ESM, INM-CM4-8;

- критерии согласия показали, что наиболее близкими к предельным значениям являются модели ACCESS-ESM1-5, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg-LR, INM-CM4-8, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, NESM3 для критерия эффективности и модели CNRM-ESM2-1, INM-CM4-8, MRI-ESM2-0, NESM3.

Согласно статистическим критериям, рассчитанным по значениям максимальной высоты волны по данным моделей CMIP6, получено, что

наиболее применимыми являются EC-Earth3-Veg-LR, CNRM-ESM2-1, INM-CM4-8 (рисунок В.11 Приложения В).

В результате расчета статистических параметров получено, что для средней и максимальной высоты волны модели CNRM-ESM2-1, INM-CM4-8 имеют достаточно хорошую согласованность с фактическими данными. Однако стоит отметить, что прибрежные наблюдения за волнением проводятся визуально.

Для работ на море наиболее важной характеристикой волнения являются его наибольшие значения, так как штормовые волнения могут причинить большой ущерб прибрежным, морским сооружениям, а также судам на море. Дальнейшие расчеты проекции изменения высоты волны в будущем до 2050 г. проведены для максимальных высот волны по двум сценариям изменения климата SSP1.26 и SSP5.85 ансамбля из 13 моделей CMIP6 и отдельно по моделям CNRM-ESM2-1, INM-CM4-8.

Были отобраны 4 наиболее важных района в казахстанской части Каспийского моря, таких как остров Кулалы, Форт-Шевченко, Актау, Курьк, где находятся важные объекты для социально-экономической сферы Мангистауской и Атырауской областей республики и стратегические объекты на море (порты, ГТС и др.).

У острова Кулалы в период с 2015 по 2050 г. при SSP1.26 могут наблюдаться максимальные высоты волны от 1,2 м до 3,9 м с наибольшими значениями в 3,7 м в 2023 г. (CNRM-CM6-1) и 3,9 м в 2029 г. (NESM3) (рисунок 4.22, таблица В.14-В.15 Приложения В).

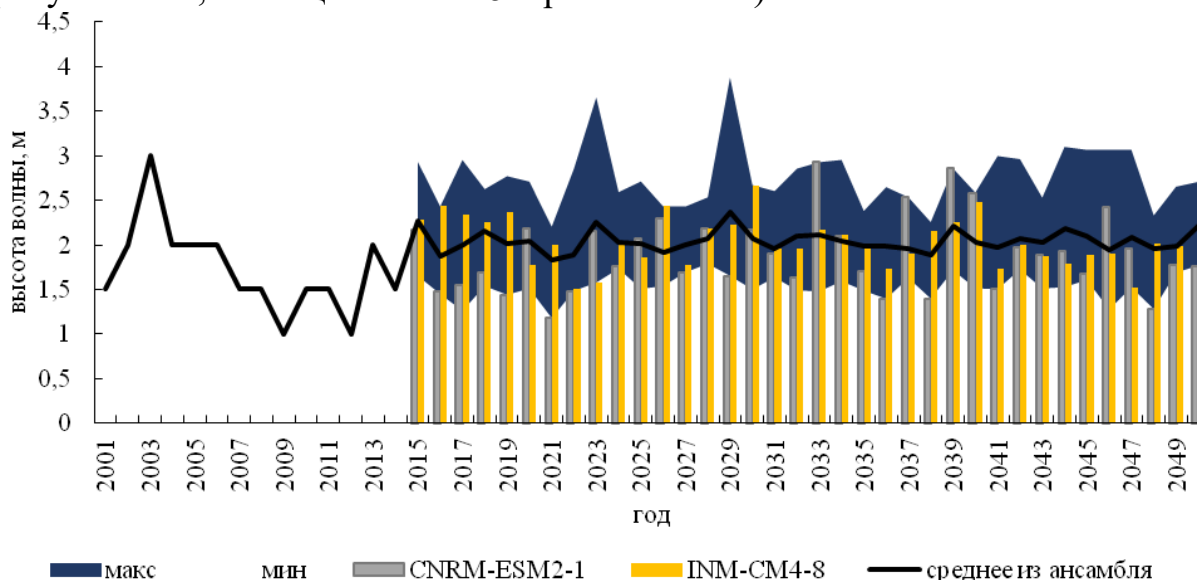


Рисунок 4.22 - Проекция максимальной высоты волны у острова Кулалы до 2050 г. по сценарию SSP1.26

По SSP 5.85 в будущем могут наблюдаться изменения максимальной высоты волны от 1,3 м до 3,4 м с наибольшими значениями в 3,4 м в 2050 г. (MPI-ESM1-2-HR) (рисунок 4.23).

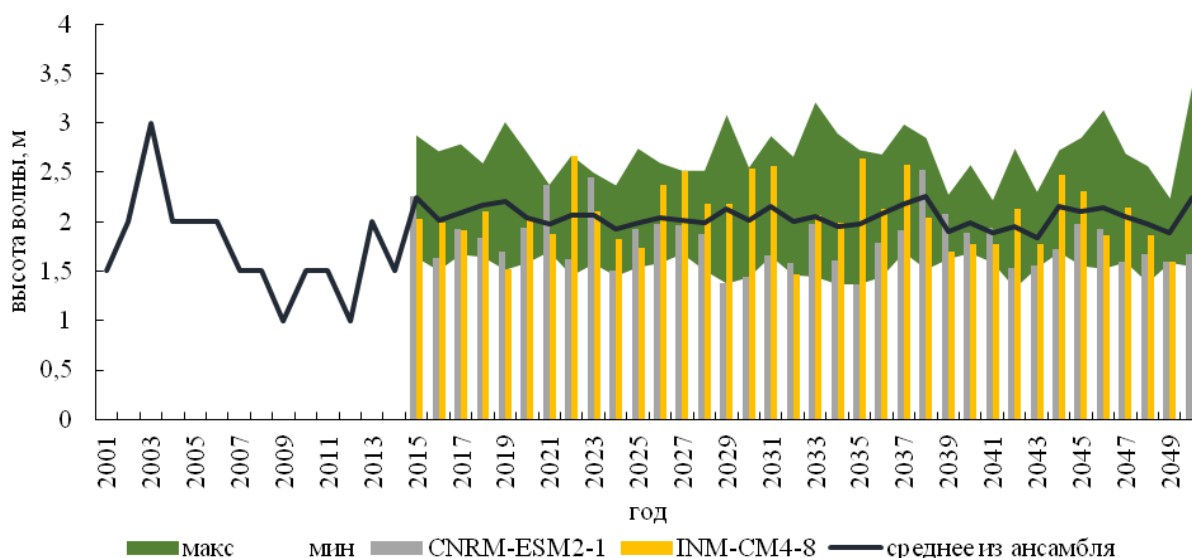


Рисунок 4.23 - Проекция максимальной высоты волны у Кулалы острова до 2050 г. по сценарию SSP5.85

Изменения максимальной высоты волны по моделям CMIP6 у Форт-Шевченко (таблица В.16-В.17 Приложения В) на будущее до 2050 г. при сценарии изменения климата SSP1.26 показали, что в будущем могут наблюдаться максимальной высоты волны от 1,1 м до 4,0 м с наибольшими значениями в 3,6 м в 2023 г. (CNRM-СМ6-1) и 4,0 м в 2029 г. (NESM3) (рисунок 4.24).

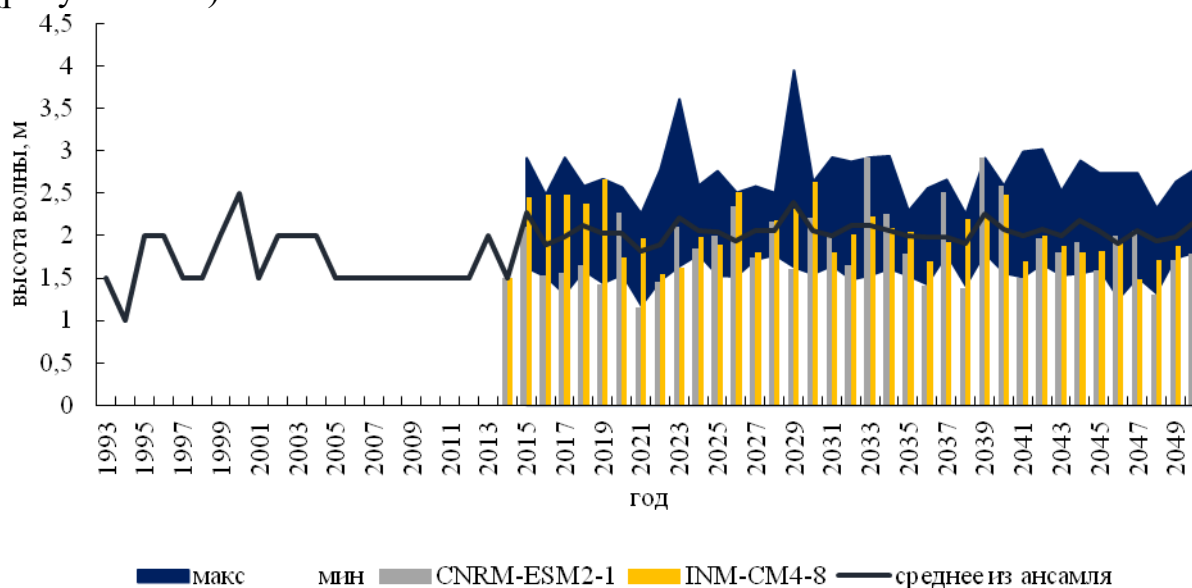


Рисунок 4.24 - Проекция максимальной высоты волны у Форт-Шевченко до 2050 г. по сценарию SSP1.26

Для Форт-Шевченко по сценарию SSP 5.85 с 2015 г. по 2050 г. максимальные высоты волн могут изменяться от 1,4 м до 3,4 м с наибольшими значениями в 3,3 м в 2029 г. (MRI-ESM2-0), 2033 г. (KIOST-ESM) (рисунок 4.24). и 3,4 м в 2050 г. (MPI-ESM1-2-HR) (рисунок 4.25).

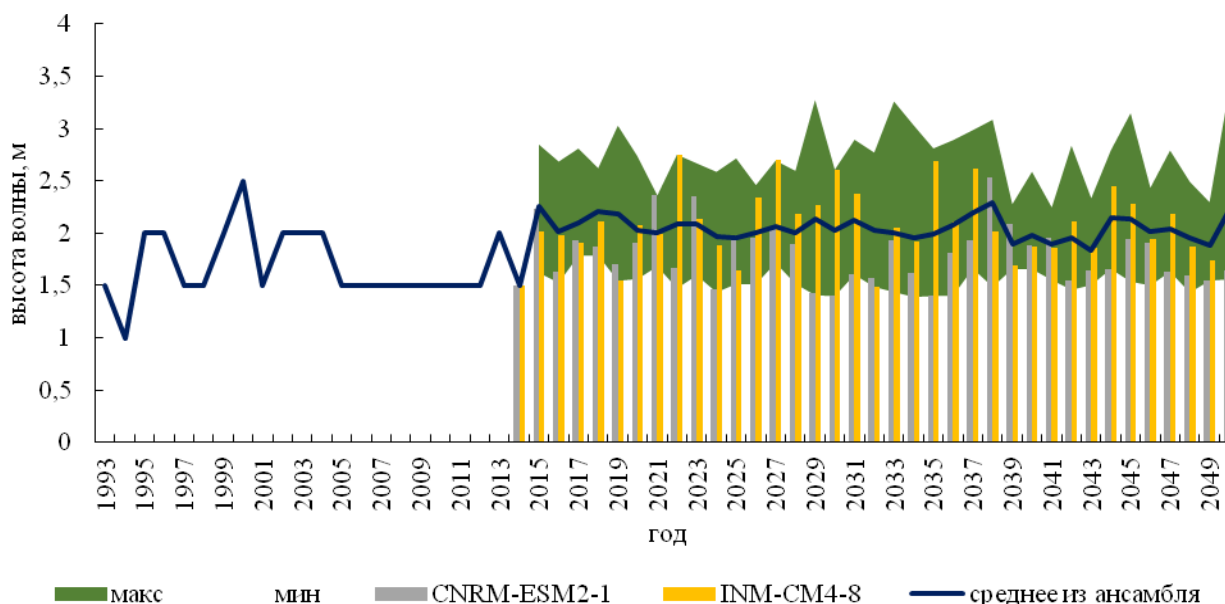


Рисунок 4.25 - Проекция максимальной высоты волны у Форт-Шевченко до 2050 г. по сценарию SSP5.85

Изменения максимальной высоты волны по моделям CMIP6 у Актау (таблица В.18-В.19 Приложения В) на будущее до 2050 г. показало, что при сценарии изменения климата SSP1.26 могут наблюдаться максимальной высоты волны от 1,3 м до 3,6 м с наибольшими значениями в 3,6 м в 2023 г. (CNRM-CM6-1), в 2029 г. (NESM3), в 2042 г. (CESM2) (рисунок 4.26).

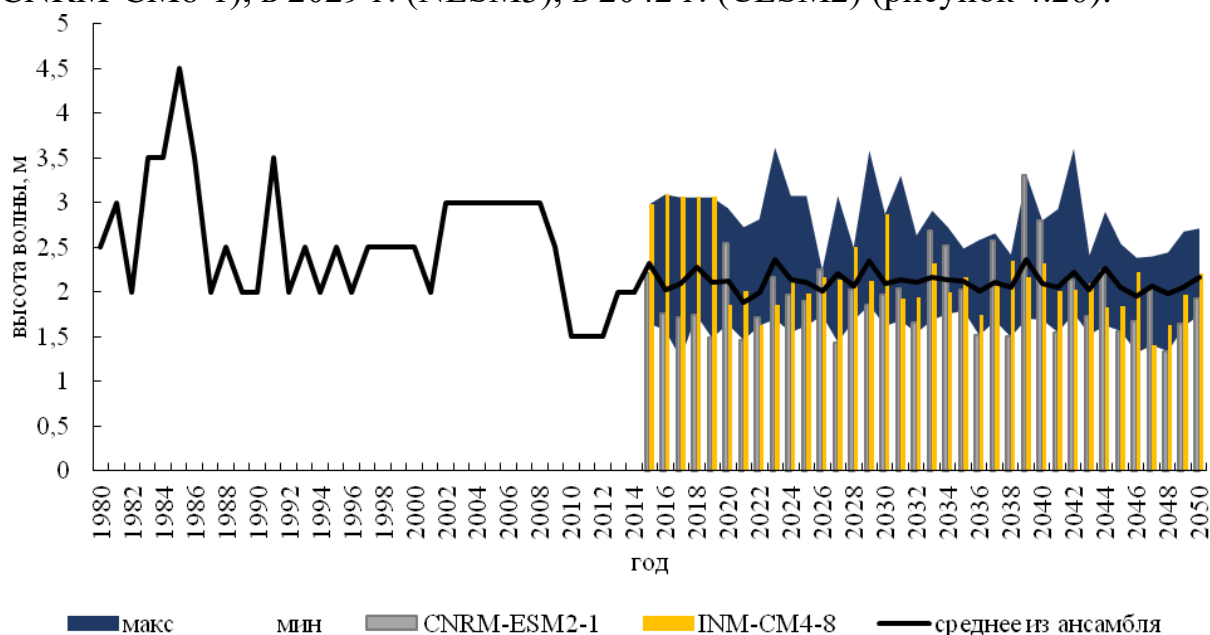


Рисунок 4.26 - Проекция максимальной высоты волны у Актау до 2050 г. по сценарию SSP1.26

В свою очередь у Актау по сценарию SSP 5.85 с 2015 г. по 2050 г. максимальные высоты волн могут изменяться от 1,5 м до 4,1 м с наибольшими значениями в 4,1 м в 2029 г. (MRI-ESM2-0) (рисунок 4.27).

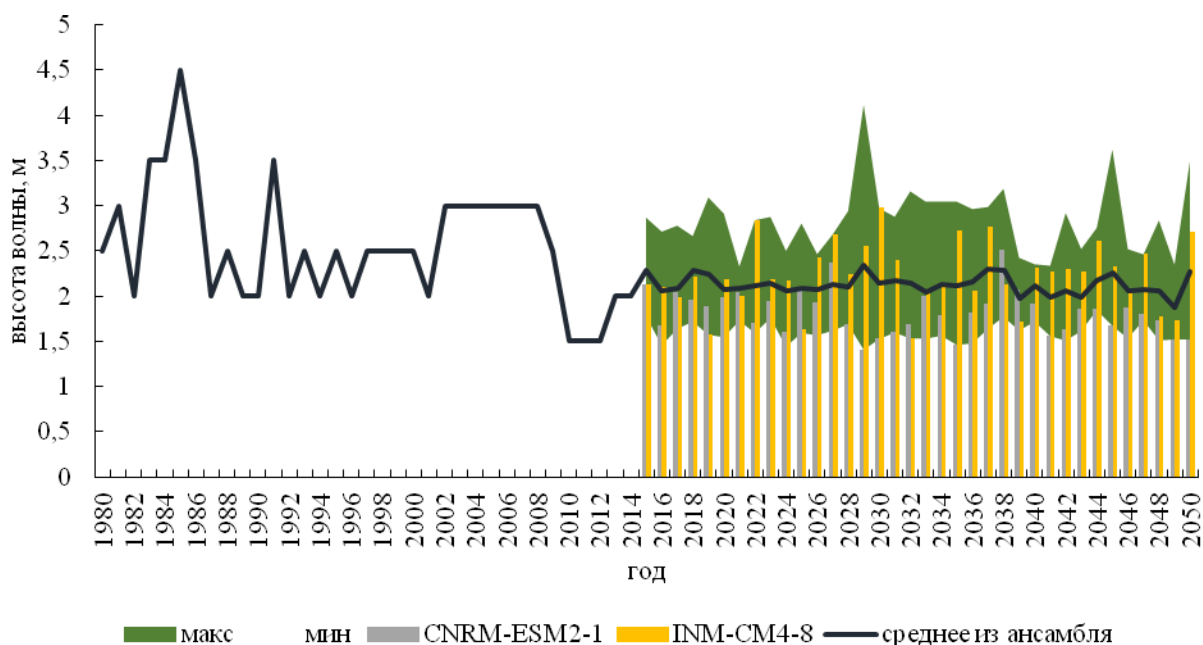


Рисунок 4.27 - Проекция максимальной высоты волны у Актау до 2050 г. по сценарию SSP5.85

Изменения максимальной высоты волны по моделям СМIP6 у Курыка (таблица В.20-В.21 Приложения В) на будущее до 2050 г. показало, что при сценарии изменения климата SSP1.26 могут наблюдаться максимальные высоты волны от 1,3 м до 3,9 м с наибольшими значениями в 3,9 м в 2029 г. (NESM3) (рисунок 4.28).

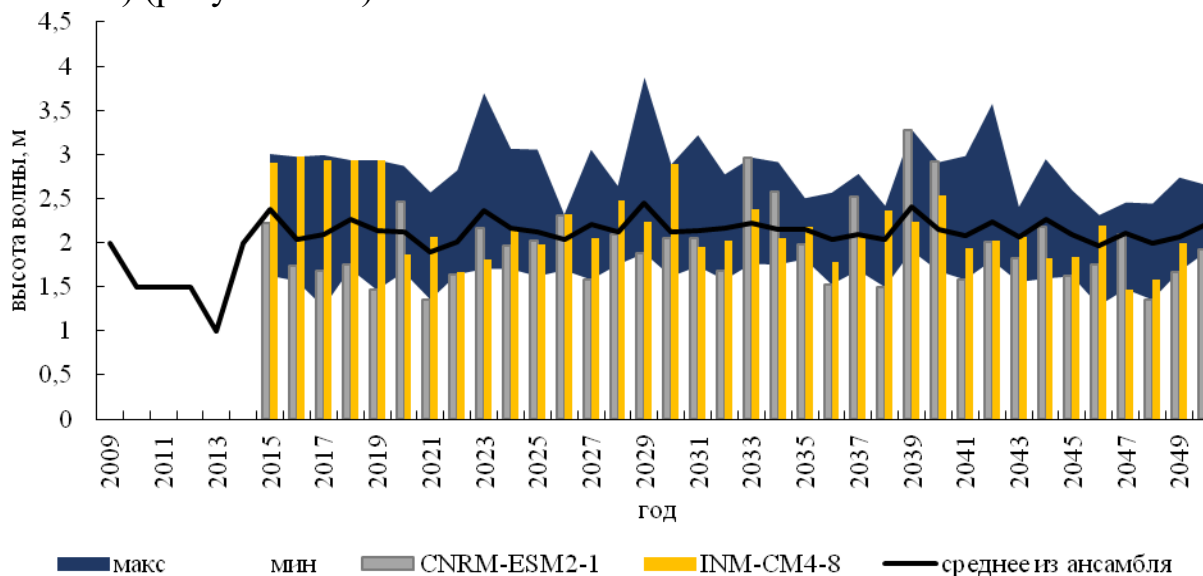


Рисунок 4.28 - Проекция максимальной высоты волны в районе Курыка до 2050 г. по сценарию SSP1.26

В свою очередь у Курыка по сценарию SSP5.85 до 2050 г. максимальные высоты волн могут изменяться от 1,4 м до 4,0 м с наибольшими значениями в 4,0 м в 2029 г. (MRI-ESM2-0) (рисунок 4.29).

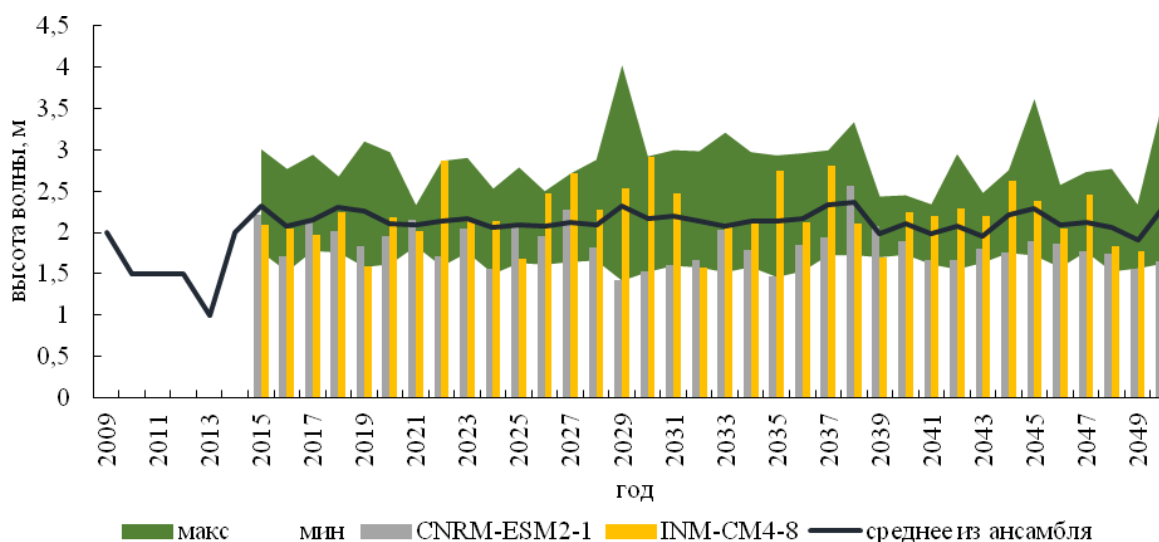


Рисунок 4.29 - Проекция максимальной высоты волны в районе Курыка до 2050 г. по сценарию SSP5.85

Пространственное изменение средней и максимальной высоты волны за 2022–2050 гг. по акватории Каспийского моря представлены на рисунках 4.27–4.287

Распределение высоты волны на акватории Каспийского моря на будущее по проекции изменения климата SSP 1.26 показало, что средняя высота волны колебалась от 0,65 м до 1,25 м со средним значением в 1,02 м, максимальное значение было от 1,86 м до 5,58 м (рисунок 4.30).

В казахстанской части моря возможны образования значительных и сильных волн в будущем (за период 2022–2050 гг.), однако наибольшие для моря высоты волн могут наблюдаться в западной части моря у Азербайджанского берега, примыкающего к Апшеронскому полуострову, который по историческим данным вследствие географического положения, орографического эффекта подвержен сильным и штормовым ветрам.

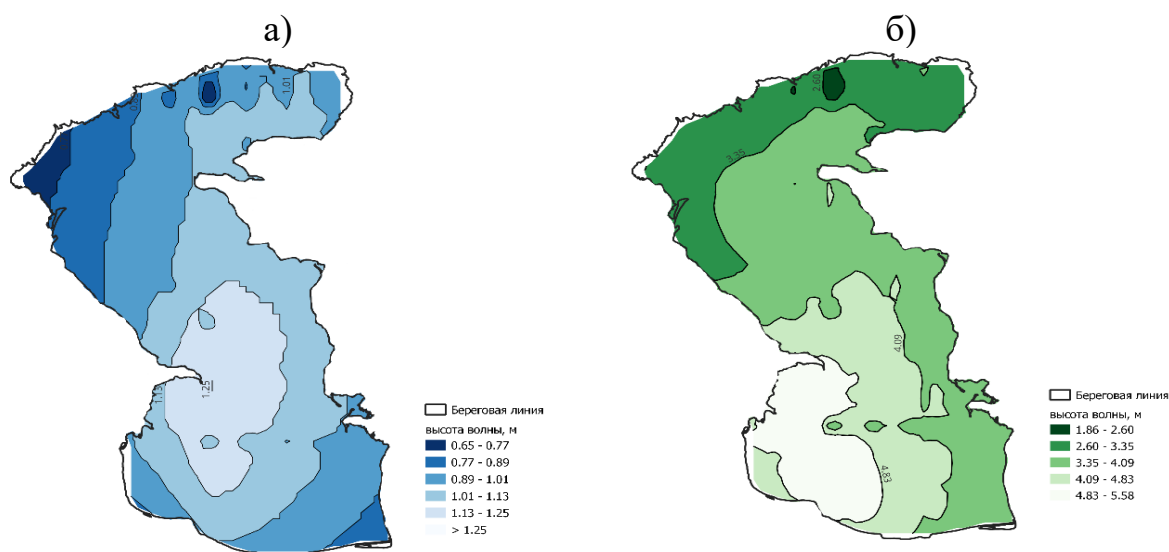


Рисунок 4.30 – Карта распределения а) средней и б) максимальной высоты волны на основе проекции SSP 1.26 за 2022–2050 г.

Высоты волн на будущее по проекциям изменения климата при SSP 5.85 на акватории Каспийского моря (рисунок 4.31) возможно в среднем будут от 0,65 м до 1,2 м, со средним значением по всей акватории в 0,99 м. В свою очередь максимальная высота волны была равна 5,79 м, а наименьшее расчетное максимальное значение 1,73 м.

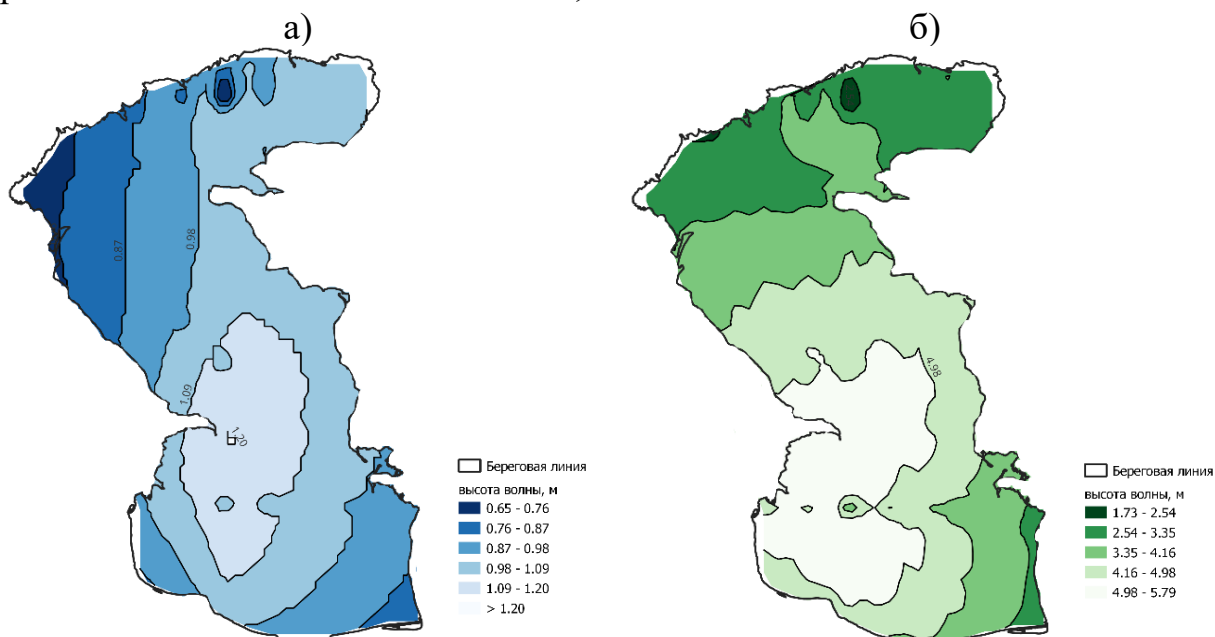


Рисунок 4.31 – Карта распределения а) средней и б) максимальной высоты волны на основе проекции SSP 5.85 за 2022–2050 г.

При сценарии SSP 5.85 северо-восточная часть моря возможно будет под влиянием умеренного и значительного волнения, а в восточной части распространятся сильные волны.

Разница максимальных значений при двух рассматриваемых сценариев изменения климата не значительна и однонаправленных тенденции не имеет.

Выводы к 4 главе:

1. Сильное ветровое волнение на море может привести к разрушению береговых сооружений, судов, приводит к задержке заходов судов и выхода из него, разрушение берегов и прибрежных пляжей. Основные волнообразующими факторами при ветровом волнении являются скорость и продолжительность действия ветра, длина разгона, глубина водоема, береговая линия. Так размывание и разрушение берегов, разрушение береговых сооружений, перемещение наносов и заполнение судоходных каналов и портовых акваторий, влияние на навигацию, рыбный промысел и др. являются последствиями влияния высокого волнения на акваторию моря.

2. Визуальные наблюдения на прибрежных станциях показали, что наибольшие высоты волн наблюдались в Среднем Каспии до 4,5 м.

3. Составленный «Каталог сильного волнения» (волнение высотой волны более 2 м) позволил выделить наибольшие высоты волн, преобладающее направление волнения и ветровые условия, приводящие к образованию сильного волнения и продолжительность данного явления.

Так их количество за 1980–2021 гг. составило 265 случаев с преобладанием западного, северо-западного, юго-восточного.

4. Характеристики волнения на основе данных ДЗЗ показали, что

- По альтиметрическим данным наибольшие значения средней годовой высоты волны наблюдаются в период 2011–2015 гг., с максимумом в 1,75 м в 2011 г. Во внутригодовом распределении значительной высоты волны с 2002 г. по 2021 г. видно, что наибольшие значения наблюдаются в холодный период года (октябрь-март). Максимум в январе с постепенным понижением в мае-июле и дальнейшим ростом к декабрю. Так наибольшее среднее значение было наблюдаено в феврале 2012 г. равное 2,43 м.

- По данным модели ECWAM ЕЦСПП средние значения высоты ветрового волнения колебались в пределах 0,1–1,0 м, максимальные от 0,3 м до 3,6 м, минимальные 0,03–0,25 м. По данным ЕЦСПП на акватории Каспийского моря средним направлением ветрового волнения является южное, юго-восточное и юго-западное. Средний период ветрового волнения за 1959–2021 гг. было от 3 с до 4 с, а максимальные значения в пределах 3–7 с, минимальные в пределах 2–3 с. По данным ЕЦСПП наибольшие значения среднего периода ветрового волнения были в марте, августе и декабре.

5. В настоящее время для расчета ветрового в казахстанском секторе Каспийского моря адаптирована спектрально-волновая модель SWAN, также применяется статистический метод, основанный на использовании кривой Бретшнейдера.

6. Расчет волнения при стационарных характеристиках ветра показал, что при слабом ветре (в 5 м/с) высота волны может достигать 1,2 метра северо-восточного, юго-восточного, юго-западного и северо-западного направления.

При ветре со скоростью 10 м/с высота волны в средней части моря может достигать 3,5 м, а в северной части 1,2 м. При постоянном, устойчивом ветре со скоростью 20 м/с в течение трех суток по расчетам высота волны может колебаться от 8,3 м до 22,7 м на акватории моря в зависимости от направления ветра.

7. По результатам моделирования высоты волны с применением модели SWAN за 1959–2021 гг. на основе данных реанализа ERA5 получено, что для акватории Каспийского моря средние значения высоты волны были около 0,4 м, с колебаниями от 0,3 м до 0,5 м, максимальные значения колебались от 1,6 м до 3,2 м, со средним значением 2,0 м. Также в этот период преобладающим направлением ветрового волнения являлось юго-восточное, южное и юго-западное.

Так в казахстанском секторе моря за многолетний период распространены в среднем умеренные волны и при максимальных характеристиках сильные волны. Так же, как и по данным наблюдений в 1985 г., 1991 г., 2016 г. отмечаются повышения среднего значения высоты волны.

Максимальные высоты по акватории моря были выше, чем в отдельных пунктах у казахстанского сектора Каспийского моря.

Внутригодовое распределение средней высоты волны показало, что наибольшие высоты волн характерны для холодного периода года (январь-март).

Высота волны редкой повторяемость (при обеспеченности 0,1 %) при средних значениях составила от 0,94 м до 1,56 м, при максимальных 3,45 м.

Расчетные величины высоты волны удовлетворительно согласуются с наблюдаемыми данными на прибрежной акватории, в связи с этим проведен анализ сравнения результатов двух рассматриваемых в данной работе моделей (ECWAM и SWAN) который показал, что разница между ними составляет от 0,05 м до 0,55 м. В целом данные имеют между собой неплохую связь, коэффициенты корреляции более 0,5.

Применение численного моделирования и данных ДЗЗ дает возможность описать режим волнения на акватории Каспийского моря.

8. Отдельно для акватории у порта Актау проведены расчеты характеристик ветрового волнения за 2018–2019 гг. За этот период максимальная высота волн (более 3 м) была зафиксирована в 6 случаях при направлении волн на северо-запад и юго-восток. Расчетная высота волны у порта Актау хорошо согласуются с данными спутников альтиметров.

9. В целом можно сделать вывод, что качество воспроизведения смоделированных данных соответствует современным реализациям волновых моделей и имеет достаточно высокую связь.

10. Расчеты проекции высоты волны на будущее до 2050 г. по данным климатических моделей набора данных NEX-GDDP-CMIP6 для двух из сценариев выбросов парниковых газов (SSP1.26 и SSP5.85) показали, что для средней и максимальной высоты волны наиболее высокую корреляционную связь с фактическими данными имеют 13, из них наиболее точными и достаточно хорошую согласующимися с фактическими данными являются модели CNRM-ESM2-1, INM-CM4-8.

В казахстанском секторе Каспийского моря отобраны 4 наиболее важных района в казахстанской части Каспийского моря (Кулалы остров, Форт-Шевченко, Актау, Курык), где находятся важные объекты для социально-экономической сферы Мангистауской и Атырауской областей и стратегические объекты на море (порты, ГТС и др.).

Для всех рассматриваемых районов до 2050 г. максимальные высоты волн могут изменяться от 1,1 м до 4,0 м при SSP1.26 с наибольшими значениями в 2023 г., 2029 г., 2042 г.; от 1,3 м до 4,1 м при SSP5.85 с наибольшими значениями в 2029 г., 2033 г., 2050 г.

В казахстанской части моря возможны образования значительных и сильных волн в будущем (за период 2022–2050 гг.).

5 РАЙОНИРОВАНИЕ АКВАТОРИЙ МОРЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ МОРЕПЛАВАНИЯ

Расположение одного из стратегических участков недр для государства в казахстанском секторе Каспийского моря предусматривает обеспечение безопасности для работ на море и предотвращение чрезвычайных ситуаций техногенного характера [173]. Обеспечение безопасности работ на море в Северном Каспии должно соответствовать требованиям 19 главы Экологического Кодекса Республики Казахстан, в том числе по обеспечению нормального нерестового хода рыб, сохранение птиц в местах гнездования и популяции каспийского тюленя [174].

Согласно 13 пункта, 1 параграфа, 2 Главы Правил плавания в территориальных водах РК «Каждому судну необходимо следовать с безопасной скоростью, рассчитанной с учетом различных факторов, в том числе о состоянии ветра, моря и течений, а также близости навигационных опасностей» [175].

Состояние поверхности моря определяется в баллах, содержит характеристики внешнего вида водной поверхности, создаваемые ветром различной силы.

Состояние моря характеризуется, в том числе, по степени волнения. Шкала степени волнения в зависимости от максимальной высоты подразделяется от слабого до исключительного волнения, достигающего до 11 м [128].

Расчеты и прогнозы волнения на крупных водных объектах приобретают важное практическое значение. Для мореплавания, строительства судов и их эксплуатации, проектирования и строительства различных гидротехнических сооружений на шельфе моря и на побережье, деятельность которых зависит от волнения моря, важно знать размеры и характеристики волн в том или ином районе акватории моря или побережья [128]. Среди всех характеристик волнения наиболее важными являются максимальные высоты волн, так как высокие волны представляют наибольшую опасность для мореплавания и для гидротехнических и шельфовых сооружений. Высота волны и их направление распространения существенно влияют на скорость плавания судов на море, что в свою очередь влияет на экономические показатели работы судов.

В связи с этим были построены карты зонирования акватории казахстанского сектора Каспийского моря по степени волнения за ретроспективный период 1959–2021 гг. (рисунок 5.1) и на будущее за период 2022-2050 гг. по двум сценариям изменения климата SSP1.26 и SSP5.85(рисунок 5.2).

Акватория казахстанского сектора Каспийского моря была поделена на 5 районов:

1. Курык – расположен порт Курык, месторождение аль-Фараби;

2. Актау – расположен г. Актау, порт Актау;
3. Форт-Шевченко – расположен г. Форт-Шевченко, остров Кулалы, порт Баутино;
4. северо-восточный Каспий – расположены месторождения Кашаган, Каламкас-море, Абай, Исатай, Жамбыл, Курмангазы, Хазар.

Для казахстанского сектора Каспийского моря в связи с очень редкой повторяемостью очень сильных и исключительных волн шкала степени волнения была подстроена под максимальные возможные расчетные высоты волн, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Шкала степени волнения казахстанского сектора Каспийского моря

Высота волны, м	Степень волнения	Баллы	Цветовой код района
1,0-2,0	Умеренное	I	
2,0-3,0	Значительное	II	
3,0-4,0	Значительное	III	
4,0-5,0	Сильное	IV	
5,0-6,0	Сильное	V	

Карты районирования были построены на основе «Атлас районирования морей и океанов для гидрометеорологического обеспечения морской деятельности» [176], которая включает схему районирования Каспийского моря. Граница казахстанской части моря проведена по точкам деления между прикаспийскими странами [177, 178, 179]

В связи с небольшими глубинами и падением уровня моря в настоящее время на северо-восточной части моря (район 4) условно принято, что на данной акваторий моря ветровое волнение не может превышать 1-2 м и степень волнения будет умеренное в I балл.

Карта зонирования по степени волнения (рисунок 5.1) по данным за ретроспективный период (1959–2021 гг.) показала, что в районах 1-3 преобладающими были волны значительной степени (II балла), во 2-3 районе также наблюдалось значительное волнение в III балла.

Карта зонирования по степени волнения на будущее (2022-2050 гг.) по сценарию SSP1.25 показала, что в 1-2 районах наблюдаются волнения значительной степени в III балла и сильной степени волнения в IV балла. А в 3 районе распространено значительное волнение в III б (рисунок 5.2а).

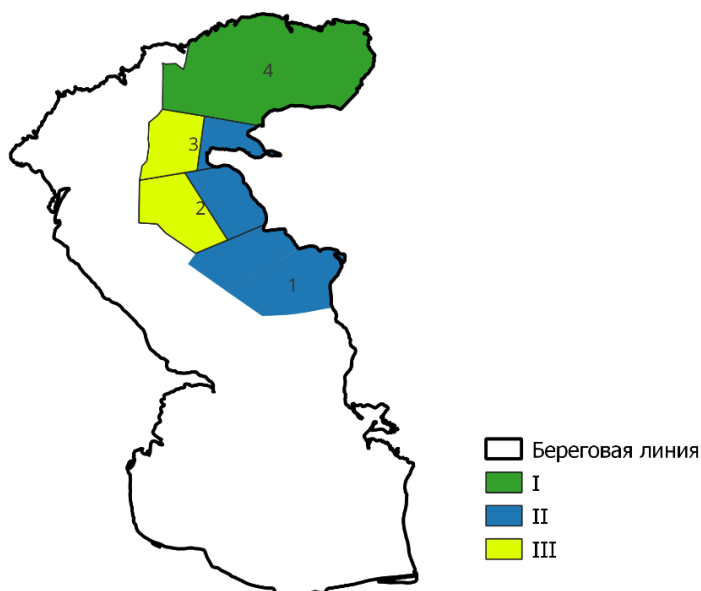


Рисунок 5.1 - Карта зонирования казахстанского сектора Каспийского моря по степени волнения по ретроспективным данным

В будущем по данным сценария изменения климата SSP5.85 будет, 1 районе будет сильное волнение в IV балла и V баллов, во 2 районе сильное волнение в IV балла и значительное волнение в III балла, в 3 районе значительное волнение в II балла и III балла (рисунок 5.2б).

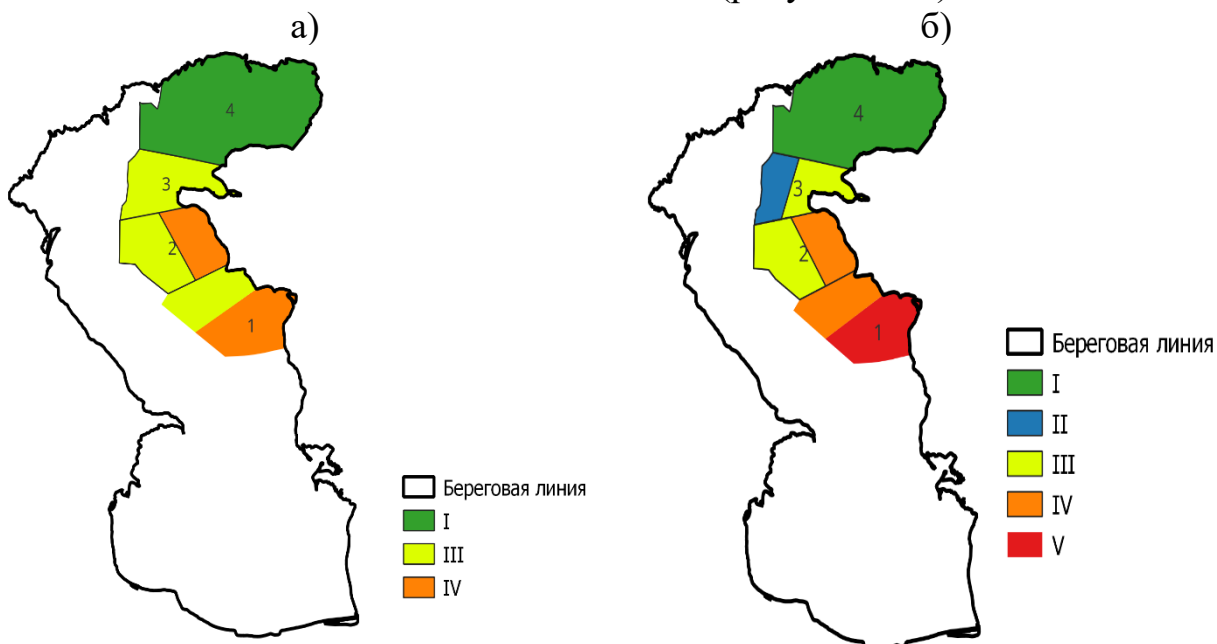


Рисунок 5.2 - Карта зонирования казахстанского сектора Каспийского моря по степени волнения по проекциям изменения климата на 2022–2050 г. по сценариям а) SSP1.26, б) SSP5.85

Значения изменения высоты волны по сезонам года представлено в таблице 5.2.

Наименее подверженное влиянию сильного волнению период — это весна, где за многолетний ретроспективный период высота волны в

казахстанском секторе моря была от 1,1 м до 2,7 м, в перспективе на будущее до 2050 г. не превышала 2,05 м.

Летом, также отмечается значительное волнение, не превышавшее за 1959–2021 гг. 1,7 м, однако по проекциям на будущее высота волны возможно достигнет сильной степени волнения в 4 и 5 баллов.

Холодный период года (осень-зима) является наиболее подверженным влиянию сильного волнения на акватории моря, в основном в 5 баллов, когда максимальная высота волны достигала 3,2 м по ретроспективным данным. Результаты расчета проекции изменения климата показали, что при сценарии SSP1.25 максимальная высота волны может достичь 4,59 м, при SSP5.85 может составить 5,68 м и достичь верхнего предела сильной степени волнения в 6 баллов.

Таблица 5.2 – Изменение расчетных максимальных высот волны в казахстанском секторе Каспийского моря

№	Район	Высота волны, м				
		Ретроспектива		Проекция климата SSP1.26		Проекция климата SSP5.85
ГОД						
1	Фетисово	2,06-2,63		3,10-	4,34	3,76-5,11
2	Курык	2,63-2,91		3,10-	4,34	3,76-5,11
3	Актау	2,63-3,19		3,10-	4,34	3,08- 4,43
4	Форт-Шевченко	2,63-3,19		3,10-	4,34	2,40- 3,76
5	Северо-восточный Каспий	1,50-	3,19	1,86-	4,34	1,73- 3,76
ЗИМА						
1	Фетисово	2,2-2,9		2,64-	4,59	3,67-5,68
2	Курык	2,2-2,9		2,64-	4,59	3,67-5,68
3	Актау	2,5-3,2		2,64-	4,59	2,67- 4,67
4	Форт-Шевченко	2,9-3,2		2,64-	3,62	2,67- 3,67
5	Северо-восточный Каспий	1,5-	2,5	1,66-	3,62	1,66 - 4,67
ВЕСНА						
1	Фетисово	2,1-2,7		1,21-	2,05	1,10- 1,85
2	Курык	2,1-2,7		1,21-	2,05	1,10- 1,85
3	Актау	2,4-2,7		1,21-	2,05	1,10- 1,85
4	Форт-Шевченко	2,1-2,7		1,21-	2,05	1,10- 1,85
5	Северо-восточный Каспий	1,1-	2,4	0,8-	2,05	0,73- 1,85
ЛЕТО						
1	Фетисово	1,4-1,7		2,63-	4,60	3,73-5,79
2	Курык	1,4-1,6		2,63-	4,60	3,73-4,76
3	Актау	1,4-1,6		2,63-	3,62	2,69- 4,76
4	Форт-Шевченко	1,4-1,6		2,63-	3,62	2,69- 3,73
5	Северо-восточный Каспий	0,8-	1,6	1,65-	3,62	1,66- 3,73
ОСЕНЬ						
1	Фетисово	1,7-	2,5	3,62-4,59		3,67-5,68
2	Курык	2,0-2,5		2,64-	4,59	3,67-5,68
3	Актау	2,0-2,5		2,64-	3,62	2,67- 4,67
4	Форт-Шевченко	2,3-2,5		2,64-	3,62	2,67- 3,67
5	Северо-восточный Каспий	1,1-	2,3	1,66-	3,62	1,66- 4,67

Примечание: Цвета соответствуют шкале степени волнения, представленной в таблице 5.1

В настоящее время одной из главных глобальных, общемировых угроз безопасности населения Земного шара являются экологические проблемы, в том числе сокращение озонового слоя, глобальное потепление, загрязнение Мирового океана, сокращение биологических видов и др [180]. В нашем

регионе особое место занимает проблема экологического состояния Каспийского моря, которая омывает берега пяти государств.

В связи с тем, что к 2050 г. высота волны может достичь 6 м в Среднем Каспии, для предотвращения техногенных и природных чрезвычайных ситуации на побережье и акватории моря, необходимо:

- ввести в районах подверженных опасным гидрометеорологическим явлениям (сгонно-нагонные явления, сильное волнение, шторм и др.) особый режим в периоды прохождения стихийных явлений;

- места для размещения сооружений на море необходимо выбирать в соответствии с правилами санитарной охраны прибрежных вод;

- при планировании мероприятий в прибрежной зоне нужно располагать данными о высоких и низких уровнях, максимальных высотах волн редкой повторяемости на ближайшую перспективу.

Для предотвращения влияния волновых процессов необходимо строительство защитных дамб в районах нефтяных месторождений и населенных пунктов, а также укрепление и реконструкция построенных ранее.

Выводы к 5 главе:

1. В многолетнем значении максимальные высоты волн за год достигали степени волнения «значительное и сильное».

2. По степени волнения наиболее открытым периодом для навигации и проведения работ на море является весна, как по историческим данным, так и на будущее.

3. Холодный период года является наиболее подверженным влиянию сильного волнения на открытой части казахстанского сектора Каспийского моря, в основном в 5 баллов, когда максимальная высота волны достигала 3,2 м по ретроспективным данным. Результаты расчета проекции изменения климата показали, что при сценарии SSP1.25 максимальная высота волны может достичь 4,59 м, а при SSP5.85 может составить 5,68 м и достичь верхнего предела сильной степени волнения в 6 баллов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Побережье Каспийского моря относится к региону, который подвержен экологическому кризису. Увеличение хозяйственной нагрузки возлагает на прибрежные государства ответственность за сохранение природной среды. Для обоснованного выбора мероприятий по защите природных объектов от чрезмерного антропогенного воздействия и возможных чрезвычайных ситуации природного характера необходимо располагать достоверными знаниями о характере самих природных процессов.

Динамичность атмосферы предопределяет возможность возникновения штормовых явлений на море. Сильное волнение и ветер может привести к потере управления судами, что может привести к возникновению аварийных ситуаций при столкновении судов с платформой или к их затоплению.

Сильное ветровое волнение на море может привести к разрушению береговых сооружений, судов, приводит к задержке заходов судов и выхода из него, разрушение берегов и прибрежных пляжей. Основные волнообразующими факторами при ветровом волнении являются скорости и продолжительность действия ветра, длина разгона, глубина водоема, береговая линия. Так размывание и разрушение берегов, разрушение береговых сооружений, перемещение наносов и заполнение судоходных каналов и портовых акватории, влияние на навигацию, рыбный промысел являются последствиями влияния высокого волнения на акваторию моря.

В связи с этим в данной диссертационной работе были исследованы волновые процессы, а также их главный фактор формирования на Каспийском море ветровой режим над морем.

Анализ средней скорости ветра, наблюдаемой в казахстанской части Каспийского моря, показал, что существует тенденция уменьшения средней скорости ветра. В северо-восточной части моря средние многолетние скорости ветра за период 1990-2021 гг. уменьшились на 7 % по сравнению с периодом 1961-1989 гг., и находятся в пределах 4,2 м/с, также и в средней части казахстанского сектора моря за последние 30 лет значения уменьшились на 4 % по сравнению с периодом 1960–1989 гг. и составили 4,3 м/с. По данным реанализа ERA5 также имеется тенденция к снижению средней скорости ветра в последние 10-15 лет.

В целом, для восточного побережья Каспийского моря характерны более слабые ветра, чем в северо-восточной части.

Наблюдается высокая повторяемость восточных, юго-восточных, северных направлений ветра. В холодные периоды года зимой и осенью преобладают ветра восточного румба (направленные на берег), летом чаще наблюдаются ветра северного, западного и северо-западного (направленные на море) направления.

Изменение максимальных скоростей ветра в казахстанской части Каспийского моря не имеют однонаправленных тенденций, так на северо-востоке значения за период после 1990 г. уменьшаются от 20,2 м/с до 19,4 м/с, на восточном побережье есть незначительное увеличение на 5,67 %.

Однако у МГ Актау наблюдается тенденция к уменьшению на 26 % (от 18,3 м/с до 13,6 м/с).

С года начала наблюдений общее количество случаев с равным или превышением скорости ветра в 15 м/с было 1933 из них 46 % приходится на северо-восточную часть моря. Преобладающими направлениями ветра являются восточные и северо-западные, которые могут влиять на коротко периодические изменения уровня моря под воздействием ветра.

В течение года число случаев с сильным ветром (равное или более 15 м/с) распределяется довольно неравномерно. На Северном Каспии чаще наблюдаются весной, заметно реже летом. На восточном побережье Среднего Каспия максимум числа случаев со скоростью ветра более 15 м/с приходится на зиму и начало весны, минимум также на лето.

Динамика распространения сильных ветров не имеет однонаправленных трендов, так в северо-восточной части моря (М Пешной, МГ Форт-Шевченко) в последние годы их количество уменьшается, однако у МГ Кулалы, остров их количество направлено в сторону повышения.

По проанализированным данным (прибрежные наблюдения, данные спутников альтиметров, смоделированные данные ECWAM) определено, что максимальная высота волны наблюдается в Среднем Каспии. Наибольшие значения максимальной высоты волны наблюдались в разные периоды года, однако их количество преобладало в холодный период, что связано с тем, что наибольшие средние скорости ветра наблюдаются также рассматриваемый период.

Составлен «Каталог сильного волнения» (волнение высотой волны более 2 м), который дает возможность выделить наибольшие высоты волн, преобладающее направление волнения и ветровые условия, приводящие к образованию сильного волнения и продолжительность данного явления.

На прибрежной акватории казахстанского сектора Каспийского моря проводятся только визуальные наблюдения за волнением, в связи с этим расчеты характеристик волнения были проведены с использованием, адаптированной для данного района, спектрально-волновой моделью SWAN:

- *при стационарных характеристиках ветра:* при слабом ветре (в 5 м/с) высота волны может достигать 1,2 метра при направлении ветра на северо-восток, юго-восток, юго-запад и северо-запад; при ветре со скоростью 10 м/с высота волны в средней части моря может достигать 3,5 м, а в северной части 1,2 м; при скорости 20 м/с высота волны может колебаться от 8,3 м до 22,7 м на акватории моря в зависимости от направления ветра;

- *на основе данных реанализа ERA5* получено, что за ретроспективный период (1959-2021 гг.) средние значения высоты волны были около 0,4 м, максимальные значения колебались от 1,6 м до 3,2 м. В казахстанском секторе моря за многолетний период распространены умеренные волны, а при максимальных ветровых характеристиках - сильные волны;

Высота волны редкой повторяемости (при обеспеченности 0,1 %) при средних значениях составила от 0,94 м до 1,56 м, при максимальных 3,45 м.

- расчеты характеристик ветрового волнения за 2018-2019 гг. в районе порта Актау показали, что максимальная высота волны (более 3 м) была зафиксирована в 6 случаях, при направлении волн на северо-запад и юго-восток. Расчетная высота волны у порта Актау хорошо согласуются с данными спутников альтиметров.

Расчеты проекции высоты волны на будущее до 2050 г. по данным климатических моделей набора данных NEX-GDDP-CMIP6 для двух сценариев выбросов парниковых газов (SSP1.26 и SSP5.85) показали, что до 2050 г. максимальные высоты волн могут изменяться от 1,1 м до 4,0 м при SSP1.26 с наибольшими значениями в 2023 г., 2029 г., 2042 г.; от 1,3 м до 4,1 м при SSP5.85 и наибольшими значениями в 2029 г., 2033 г., 2050 г. В казахстанской части моря возможны образования значительных и сильных волн в будущем (за период 2022-2050 гг.).

В результате анализа карт зонирования акваторий Каспийского моря по степени волнения определено, что по степени волнения наиболее открытым периодом для навигации и проведении работ на море является весна, как по историческим данным, так и на будущее.

Холодный период года является наиболее подверженным влиянию сильного волнения на открытой части казахстанского сектора Каспийского моря, в основном в 5 баллов, когда максимальная высота волны достигала 3,2 м по ретроспективным данным. Результаты расчета проекции изменения климата показали, что при сценарии SSP1.25 максимальная высота волны может достичь 4,59 м, а при SSP5.85 может составить 5,68 м и достичь верхнего предела сильной степени волнения в 6 баллов.

Из за того, что к 2050 г. высота волны может достичь 6 м в Среднем Каспии, для предотвращения техногенных и природных чрезвычайных ситуации на побережье и акватории моря, необходимо ввести в районах подверженных опасным гидрометеорологическим явлениям особый режим в периоды прохождения стихийных явлений, также для предотвращения влияния волновых процессов необходимо строительство защитных дамб в районах нефтяных месторождений и населенных пунктов, а также укрепление и реконструкция построенных ранее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каспийское море: Гидрология и гидрохимия. – М.: Наука, 1986 г. -261 с.
2. Проект «моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том VI Каспийское море, выпуск 1 Гидрометеорологические условия. -СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 358 с.
3. Электронный атлас Каспийского моря разработан при поддержке Русского Географического Общества, 2015 г. [Электронный ресурс] <http://www.geogr.msu.ru/casp/> (дата обращения 10.05.2019 г.)
4. Нестеров Е.С. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. – М.: Триада, 2016. – 378 с.
5. Лоция Каспийского моря. - СПб.: ГУНиО, 2016. – 406 с.
6. КАСПКОМ. Информационный бюллетень о состоянии уровня Каспийского моря №23 от 13 мая 2022 года [Электронный ресурс]: http://www.caspcom.com/files/CASPCOM%20Bulletin%20No.%2023_1.pdf (Дата обращения: 15.06.2022 г.)
7. Шикломанов И.А. Исследование водных ресурсов суши: итоги, проблемы, перспективы. - Л.: Гидрометеоздат, 1988 г. – 152 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 12, Нижнее Поволжье и Западный Казахстан, Вып. 2. Урало-Эмбинский район. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 510 с
9. Терехов А.Г., Ивкина Н.И., Абаев Н.Н., Елтай А.Г., Егембердиева З.М. Валидация суточного продукта Snow Depth FEWS NET для бассейна реки Урал по данным метеорологических наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т17. №3. С.31-40.
10. Терехов А.Г., Ивкина Н.И., Юничева Н.Р., Витковская И.С., Елтай А.Г. Изменения снежного покрова сухих степей и полупустынь Казахстана на примере бассейна реки Эмба // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т17. №2. С.101-113.
11. Ивкина Н.И., Терехов А.Г., Галаева А.В., Елтай А.Г. Особенности водного режима реки Эмба (восточное побережье Каспийского моря) // Гидрометеорология и экология. 2020. №3 (98). С. 93-110.
12. Мамедов Р.М. Водный баланс и долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря, Баку, 1996.
13. Терехов А.Г., Ивкина Н.И., Абаев Н.Н., Галаева А.В., Елтай А.Г. Рекация стока реки Урал на изменения высоты снежного покрова в ее бассейне в период 2001-2019 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т17. №5. С.181-190.
14. Ibrayev R. A., Ozsoy E., Schrum C., Sur H.I. Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction // Ocean Science, № 6, 2010. – P. 311–329.
15. Ивкина Н.И., Терехов А.Г., Наурозбаева Ж.К. Колебания уровня Каспийского моря и диагностика современных изменений положения

береговой линии по спутниковым данным LANDSAT приеода 2005-2015 гг. // Гидрометеорология и экология, 2015, №2. С. 89-99.

16. Ивкина Н.И., Елтай А.Ф., Бьорн Клове, Садуокасова М.Т., Шенбергер И.В., Шишкина Г.М. Колебания уровня и их влияние на нефтяное загрязнение Казахстанского сектора Каспийского моря // Гидрометеорология и экология, 2020. №2 (97). С. 64-74.

17. Ivkina N., Galayeva A. Assesment of fluctuations in the Caspian Sea level under the influence of climate change for the future until 2050 // Гидрометеорология и экология, 2021, № 1. С. 70-7.

18. Akbari M., Baubekova A., Roozbahani A., Gafurov A., Shiklomanov A., Rasouli K., Ivkina N., Kløve B., Haghighi A. T. Vulnerability of the Caspian Sea shoreline to changes in hydrology and climate // Environmental Research Letter. №15, 2020. - 13 p.

19. Ивкина Н.И., Васенина Е.И., Елтай А.Ф. Сгонно-нагонные явления в северо-восточной части Каспийского моря в современных условиях // Гидрометеорология и экология. 2019. №2 (93). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sgonno-nagonnye-yavleniya-v-severo-vostochnoy-chasti-kaspiyskogo-morya-v-sovremennyh-usloviyah> (дата обращения: 15.05.2021).

20. Абаев Н.Н., Серікбай Н.Т., Тіллэкәрім Т.А., Елтйа А.Ф. Анализ экстремальных гидрологических явлений на территории Республики Казахстан // International Scientific Conference “Global Challenges for Global Science II”, November 25 2022, Sofia, Bulgaria.

21. Каталог сгонно нагонных явлений Каспийского моря. РГП «Казгидромет». – 2012 г. – С. 60.

22. Yeltay A., Bekdayr D. On the possibility of using reanalysis data to estimate the water temperature of the Caspian Sea // Гидрометеорология и экология, № 4, 2022. С. 45-51.

23. NASA’s ocean color web. [Электронный ресурс]. – 2022. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 20.02.2022).

24. Яицкая Н.А. Восстановление полей температуры и солености воды Каспийского моря с помощью гидродинамического моделирования // Наука и образование, 2017, №1. С. 122- 128.

25. Turuncoglu U.U., Giuliani G., Elguindi N., Giorgi F. Modelling the Caspian Sea and its catchment area using a coupled regional atmosphere-ocean model (RegCM4-ROMS): model design and preliminary results // Geoscientific Model Development, №6, 2013. - С.283–299.

26. Архипкин В.С. Гидрология прибрежного апвеллинга Черного и Каспийского морей. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. – М., 1996. – 22 с.

27. Елтай А.Ф., Ивкина Н.И., Нарбаева К.Т. Явление апвеллинга у казахстанского побережья Каспия // Гидрометеорология и экология, №3, 2019. - С.17-25

28. Атлас мирового океана [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: <https://odv.awi.de/data/ocean/world-ocean-atlas-2018/> (дата обращения: 20.08.2020).
29. Елтай А.Ф., Галаева А.В. Анализ данных атласа мирового океана применительно к Каспийскому морю // Гидрометеорология и экология, 2020. №3 (98). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-dannyh-atlasa-mirovogo-okeana-primenitelno-k-kaspiyskomu-moryu> (дата обращения: 17.12.2022).
30. Бухарицин П.И. Исследование каспийских льдов. - Palmarium Academic Publishing, 2019. - 133 с.
31. Бухарицин П.И., Огородов С.А., Архипов В.В. Воздействие ледяных образований на дно Северного Каспия в условиях колебаний уровня и ледовитости // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozdeystvie-ledyanyh-obrazovaniy-na-dno-severnogo-kaspiya-v-usloviyah-kolebaniy-urovnya-i-ledovitosti> (дата обращения: 19.11.2022).
32. Ивкина Н.И., Султанов Н.К. Особенности ледообразования в северо-восточной части Каспийского моря // Гидрометеорология и экология, № 4, 2012. - С. 42-51.
33. Ивкина Н.И., Наурозбаева Ж.К. Изменение характеристик ледового режима казахстанской части Каспийского моря, в связи с изменением климата // Гидрометеорология и экология, №2 (77), 2015. - С. 28-35.
34. Ивкина Н.И., Наурозбаева Ж.К., Бьерн Клове. Влияние изменения климатических условий на ледовый режим Каспийского моря // Центральноазиатский журнал исследований воды. №3, 2017. - С. 15-29.
35. Огородов С.А., Архипов В.В. Экзарация дна Каспийского моря ледяными торосистыми образованиями // Доклады академии наук, 2010, том 432, №3. - С. 403-407.
36. Оперативный модуль ЕСИМО. Ледовые условия в Каспийском море. [Электронный ресурс]. URL: http://193.7.160.230/web/esimo/casp/ice/ice_casp.php?date=04.12.2007 (дата обращения: 01.05.2021).
37. НИЦ «Планета». Каспийское море карта-схема ледового покрова. [Электронный ресурс]. URL: <http://planeta.infospace.ru/product.cgi/last.pl?product=68> (дата обращения: 01.05.2021).
38. Метеорологическая база данных РГП «Казгидромет» [Электронный ресурс]. URL: https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo_kz/ (дата обращения: 15.08.2022)
39. ERA5 explorer: documentation. [Электронный ресурс]. URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+explorer%3A+documentation> (дата обращения: 15.08.2022).
40. Национальный Атлас Республики Казахстан. Том 1: Природные условия и ресурсы. Алматы, 2006. – 125 с.

41. Государственный климатический кадастр. РГП «Казгидромет». [Электронный ресурс]. URL: http://ecodata.kz:3838/app_persona/ (дата обращения: 15.08.2022).
42. Обзор об особенностях климата на территории Казахстана в 2022 году. РГП «Казгидромет». -Астана, 2023. - 40 с.
43. Долгих С.А. Современное изменение климата на казахстанской территории Прикаспийского региона // Международная научная конференция «Изменение климата в регионе Каспийского моря», 27-28 октября 2021 г. С. 42-44.
44. Островская Е.В., Гаврилова Е.В., Варначкин С.А. Изменения гидролого-гидрохимического режима Северного Каспия в условиях меняющегося климата // Международная научная конференция «Изменение климата в регионе Каспийского моря», 27-28 октября 2021 г. С. 75-77.
45. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980-2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2021. Т.18. №5. С. 277-291.
46. Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2021 г. РГП «Казгидромет». Астана, 2022. - 76 с.
47. Жирнов В.М. Изучение режима волнения Каспийского моря // Информационный сборник посвященный 40-летию установления Советской власти в Азербайджане. Баку, 1960. С. 96-101.
48. Гидрологический справочник морей СССР. Т.II Каспийское море, Вып.2.-Л.: ЦУЕГМС, 1935.
49. Белов В.П., Филиппов Ю.Г. Основные черты динамики вод Азовского моря и Керченского пролива // Труды ГОИН. – 1978. Выпуск 139. С. 11-20.
50. Виленский Я.Г., Глуховский Б.Х. Экспериментальное исследование процесса морского ветрового волнения // Труды ГОИН, 1957.Выпуск 36. – С. 9-62.
51. Вапняр М.У., Керимов А.А., Тамбовцева Л.П. Об исследовании режима ветрового волнения на Каспийском море // Режимообразующие факторы, информационная база и методы ее анализа. –Л: 1989. -316 с.
52. Руководство по расчету морского волнения и ветра над морем. М.: Гидрометеоздат. Московское отделение, 1959. - 255 с.
53. Атлас ветра и волн Северного Каспия. Под редакцией Е.М. Копайгородского. - Ростов на Дону, 1964. - 58 с.
54. Прахов В.П. Влияние анизотропности морского волнения на спектр огибающей радиосигнала СВЧ диапазона, отраженного от моря // Труды ГОИН 1977, Выпуск 136. – С. 22-25.
55. Измерение истинных уклонов и синхронные измерения высот, периодов и скоростей волн // Труды ГОИН 1973, выпуск 117. - С 17-25.
56. Нормы проектирования. Параметры ветровых волн. Воздействующих на откосы транспортных сооружений на реках. ВСН 206-87. Москва, 1987 г. 58 с.

57. Координационный Комитет по гидрометеорологии Каспийского моря. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.caspcom.com/index.php?razd=main&lang=1> (дата обращения: 01.12.2018).
58. Шикломанов И.А., Васильева А.С. Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоиздат. 2003. – 400 с.
59. Оперативный модуль ЕСИМО. Прогноз параметров ветрового волнения. [Электронный ресурс]. URL: http://193.7.160.230/web/esimo/casp/wwf/wwf_casp.php (дата обращения: 01.12.2018).
60. WW3 – wave height. Caspian Sea. [Электронный ресурс]. URL: <https://mgm.gov.tr/eng/marine-metu3-wave.aspx?d=h#sfB> (дата обращения: 01.03.2019).
61. Абузьяров З.К. Морское волнение и его прогнозирование. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. - 162 с.
62. Абузьяров З.К., Шамраев Ю.И. Морские гидрологические информации и прогнозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. - 218 с.
63. Абузьяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативной океанографическое обслуживание. – М.: Обинск: ИГ-СОЦИН, 2009. - 288 с.
64. Нестеров Е.С. Экстремальные волны в океанах и морях. – М.: Обинск: ИГ-СОЦИН, 2015. - 64 с.
65. Лопатухин. Л.И. Ветро-волновой климат Каспийского моря // метеорологические исследования, Том 47. № 5. – 2019. – С. 89–97.
66. Мысленков С.А. Диагноз и прогноз ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва 2017. - 161 с.
67. Pavlova, A., Myslenkov, S., Arkhipkin, V., and Surkova, G.: Storm surges and storm wind waves in the Caspian Sea in the present and future climate // Civil Engineering Journal, Vol 8, №11, 2022. – P. 2353-2377.
68. Лебедев С.А. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва. 2014. – 350 с.
69. Lebedev S., Kostianoy A. Satellite altimetry of the Caspian Sea // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006а. – Вып. 3. Т. 2. – С. 113–120.
70. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М., Изд-во МГУ, 1982 г. - 192 с
71. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. – Москва, ИКИ РАН, 2011. – 480 с.
72. Яицкая Н.А. Ретроспективный анализ ветрового волнения в Каспийском море во второй половине XX–начале XXI вв. и связь с региональными проявлениями изменения климата // Географический вестник

- = Geographical bulletin. 2017. №2(41). - С.57–70. doi 10.17072/2079-7877-2017-2-57-70;
73. Лопатухин Л.И., Яйцкая Н.А. Волновой климат Каспийского моря. Входные данные по ветру для гидродинамического моделирования и некоторые результаты расчетов // *Океанология*, 2019, том 59, №1. - С.12-21.
74. Лопатухин Л.И., Яйцкая Н.А. Данные реанализа полей ветра над Каспийским морем для расчета режима ветрового волнения // *Водные ресурсы*, 2019, том 46, №6. – С. 598-604.
75. Мысленков С.А., Архипкин В.С., Павлова А.В., Добролюбов С.А. Волновой климат Каспийского моря по данным моделирования // *Метеорология и гидрология*, 2018, №10. - С. 60-70.
76. Strukov B.S., Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D., Martynov S.L. Verification of the Wind Wave Forecasting System for the Black, Azov and Caspian Seas // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. WCRP Informal Report № 5. CAS/JSC WGNE.* – Geneva: WMO, 2012. – P. 8.5–8.6.
77. Струков Б.С., Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытания для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // *Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний.* – 2013. – С. 64–79.
78. Amirina G., Kamranzad B., Mafi S. Wind and wave energy potential in southern Caspian Sea using uncertainty analysis // *Energy*. 120, 2017. – P. 332-345.
79. Mahmoodi R., Ardalan A.A., Hasanlou M. Wind wave numerical modeling in the caspian sea // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W4, 2017 Tehran's Joint ISPRS Conferences of GI Research, SMPR and EOEC 2017, 7–10 October 2017, Tehran, Iran*
80. Sadeghifar T., Motlagh M.N., Azad M.T., Mahdizadeh M.M. Coastal Wave Height Prediction using Recurrent Neural Networks (RNNs) in the South Caspian Sea // *Marine geodesy* <https://doi.org/10.1080/01490419.2017.1359220>
81. Golshani A., Nakhaee A., Taebi S., Chegini V., Alae M. Wave hindcast study of the Caspian Sea // *Journal of Marine engineering*, Vol.1, No.2, 2005. - P. 19-25.
82. Mahmoudof S., Takami M. Numerical study of coastal wave profiles at the sandy beaches of Nowshahr (Southern Caspian // *Oceanologia*, 64, 2022. - P. 457-472.
83. Bruneau N., Toumi R. A fully-coupled atmosphere-ocen-wave model of the Caspian Sea // *Ocean Modeling*, 2016. – P. 97-111.
84. Rusu E., Onea F. Eveluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea. *Energy*, 20137. - P. 1-14.

85. Мысленков С.А., Киселева С.В. Анализ волновой энергии в Каспийском море // *Окружающая среда и энергетика*. №2, 2022. - С. 40-50.
86. Ивкина Н.И., Галаева А.В. Прогнозирование ветрового волнения на каспийском море с помощью модели SWAN // *Гидрометеорология и экология*. 2017. №2 (85). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-vetrovogo-volneniya-na-kaspiyskom-more-s-pomoschyu-modeli-swan> (дата обращения: 16.12.2022).
87. Cazenave A., Bonnefond P., Dominh K., Schaeffer P. Caspian sea level from Topex-Poseidon altimetry: Level now falling // *Geophysical research letters*, Vol. 24, No.8. - P. 881-884.
88. Ракишева З.Б., Кудрявцева Н., Кусембаева К.К., Сахаева А.К. Studying the change of average waves of the Caspian Sea using the altimetry data // *Вестник КазНУ. Серия математика, механика, информатика*, N.1(101), 2019. - С. 59-75.
89. Kudryavtseva N., Kussembayeva K., Rakisheva Z., Soomere T. Spatial variations in the Caspian Sea wave climate in 2002–2013 from satellite altimetry // *Estonian Journal Earth Sciences*, 2019, 68, 4. - P. 225–240 <https://doi.org/10.3176/earth.2019.16>
90. Лебедев С.А. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря // *Выездной семинар-школы «Спутниковые методы и системы исследования Земли»*, Таруса, 15-20 февраля 2011 г.
91. Lebedev S.A. Flood Wave Propagation Model of the Caspian Sea Based on Satellite Altimetry Data // *Proceedings of the Symposium on 20 Years of Altimetry*, Venice. Italy. 24–29 September 2012. – Noordwijk: ESA Publications Division, 2013. – SP-710. – 6 p.
92. Lebedev S.A., Kostianoy A.G. The Caspian Sea level, dynamics, wind, waves and uplift of the Earth's crust derived from satellite altimetry // *Proceeding of the International Symposium on Remote Sensing and the Pan Ocean Remote Sensing Conference (ISRS 2006 PORSEC)*, BEXCO, Busan, Korea, 2–4 November. Seoul: Korean Society of Remote Sensing, 2006 b. – V. 2. – P. 973–976.
93. Lebedev S.A., Kostianoy A.G. Integrated using of satellite altimetry in investigation of meteorologic, hydrologic and hydrodynamic regime of the Caspian Sea // *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences* – 2008. – V. 19. – № 1–2. – P. 71–82. doi: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.116(SA).
94. Маммадов Р.М. *Гидрометеорологический атлас Каспийского моря*. Баку, 2014.
95. Судольский А.С. *Динамические явления в водоемах*. Л.: Гидрометеоздат, 1991.
96. ЕСИМО. Средняя месячная скорость ветра. [Электронный ресурс]. URL: http://esimo.oceanography.ru/esp1/index.php?sea_code=2§ion=5&menu_code=801 (дата обращения: 01.03.2020).

97. Fallah F., Mansoury D. Coastal upwelling by wind-driven forcing in the Caspian Sea: A numerical analysis // *Oceanologia*, Volume 64, Issue 2, 2022. – P. 363-375, ISSN 0078-3234, <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.01.003>.
98. Arpe K., Molavi-Arabshahi M., Alice Ghislaine Leroy S.. Wind variability over the Caspian Sea, its impact on Caspian seawater level and link with ENSO // *International Journal of Climatology* Volume 40, Issue 14. P. 6039-6054.
99. The World Bank. Offshore Wind Technical Potential in the Caspian Sea. [Электронный ресурс]. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/802421586850648405/pdf/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Caspian-Sea-Map.pdf> (дата обращения: 01.03.2020).
100. Ивкина Н.И. Ветровые условия в Северной и Средней частях Каспийского моря // *Гидрометеорология и экология*, №4, 2011. - С. 27-38.
101. Farjami H., Hesari A. Assessment of Sea Surface Wind Field Pattern Over the Caspian Sea Using Eof Analysis // *Regional studies in marine science*, v. 35. - P. 101254. doi: 10.1016/j.rsma.2020.101254
102. Shiea Ali, Bidokhti A.A. The study of upwelling in the eastern coast of the Caspian Sea using numerical simulation// *Journal of the Earth and Space Physics*, 41(3). P. 535-545. doi: 10.22059/jesphys.2015.55105
103. Hosseon F. Assessment of the sea surface wind field pattern over the Caspian Sea using EOF analysis // *Regional Studies in the Marine Sciences* 35 (2020), 101254.
104. Елтай А.Ф., Ивкина Н.И., Бьерн Клове. Влияние ветра на высоту волн в казахстанской части Каспийского моря // *Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов*. Том 5, номер 1-2, 2019. - С. 82-94.
105. Елтай А.Ф. Особенности ветрового режима в казахстанской части Среднего Каспия // *Гидрометеорология и экология*, №1, 2019. - С. 64-75.
106. Елтай А.Ф. Ветровые характеристики Каспийского моря // *Материала международной конференции студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ЭЛЕМІ»*, Алматы, 8-11 апреля. 2019 г. С. 219-223.
107. Научно-прикладной справочник по климату. Серия 3. – Многолетние данные. Ч. 1-6. – Вып. 18. – Казахская ССР. Книга 2 – Л.: Гидрометеиздат, 1989. - 440 с.
108. Справочник по климату, Вып. I-IVX. Раздел 5. Ветер; раздел 5. Ветер. – Алматы: Казгидромет, 2005. – 337 с.
109. STAR Center for Satellite Applications and Research. [Электронный ресурс]. URL: <https://manati.star.nesdis.noaa.gov/datasets/QuikSCATData.php> (дата обращения: 01.04.2019).
110. Martin, S. An introduction to ocean remote sensing. Cambridge University Press, 2014. – 496 p.
111. Zhao K., Zhao C., Chen G. Evaluation of Chinese scatterometer ocean surface wind data: Preliminary analysis // *Earth and Space Science*, 8, e2020EA001482. <https://doi.org/10.1029/2020EA001482>

112. Li X., Yang J., Wang, J., Han, G. Evaluation and Calibration of Remotely Sensed High Winds from the HY-2B/C/D Scatterometer in Tropical Cyclones // Remote Sensing. - 2022, 14, 4654. <https://doi.org/10.3390/rs14184654>
113. Young I.R., Kirezci E., Ribal A. The Global Wind Resource Observed by Scatterometer // Remote Sensing. - 2020, 12, 2920. <https://doi.org/10.3390/rs12182920>
114. EUMETSAT. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eumetsat.int> (дата обращения: 01.04.2019).
115. OSI SAF HY- В 25-km ascending. . [Электронный ресурс]. URL: https://scatterometer.knmi.nl/hy2b_25_prod/index.php?cmd=showimage&ascending=yes&day=0&flag=yes&coord.x=332&coord.y=138 (дата обращения: 01.04.2019).
116. Хан В.М. Усовершенствование долгосрочных метеорологических прогнозов на основе структурно-статистического подхода. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук, Москва, 2012. - 38 с.
117. Atmospheric Reanalyses Comparison Table [Электронный ресурс]. URL: <https://reanalyses.org/atmosphere/comparison-table> (дата обращения: 20.03.2020).
118. Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., Ebata A., Moriya M, Onoda H, Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., Takahashi K. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2015, Volume 93, Issue 1, Pages 5-48, Released on J-STAGE March 18, 2015, Online ISSN 2186-9057, Print ISSN 0026-1165, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
119. JRA-55. [Электронный ресурс]. URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/jra-55> (дата обращения: 15.05.2020).
120. NCEP-NCAR Reanalysis 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 15.05.2020).
121. Vyruchlkina T.Yu., Dianskii N.A., Fomin V.V. Effect of long-term variations in wind regime over Caspian Sea region on the evolution of its level in 1948-2017 // Water Resources, 2020, Vol. 47, No. 2. - P. 348–357.
122. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2020): ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: [10.24381/cds.f17050d7](https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7) (Accessed on 15-04-2020)
123. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J-N. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < 10-04-2020 >), [10.24381/cds.f17050d7](https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7)

124. Кошинский С.Д. О построении карт полей ветра над морем // Метеорология и гидрология, 1958, №9. - С. 27-31.
125. Шамраев Ю.И. Обеспечение народного хозяйства океанографической информацией. Л.: Гидрометеиздат, 1989 г. - 190 с.
126. Атласное картографирование в Республике Казахстан / Медеу А.Р., Акиянова Ф.Ж., Бейсенова А.С. и др. – Алматы, 2014. – 264 с.
127. Васильев К.П. Что должен знать судоводитель о картах погоды и состоянии моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980.
128. Богословский Б.Б. Волны, течения и водные массы водоемов. Коспект лекций. Л., 1980. - 58 с.
129. Кудряева К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. Морские гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1974.
130. Ежегодные данные о режиме Каспийского моря, казахстанской побережья за 2020 г. РГП «Казгидромет», Нур-Султан, 2022 г. - 61 с.
131. Елтай А.Ф. Мониторинг ветрового волнения на казахстанском побережье Каспийского моря // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы II Всерос. науч.-практ. конф., приуроченной к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования ИГУ. Иркутск, 5–7 июня 2019 г. / ФГБОУ ВО "ИГУ"; [редкол.: Сутырина Е. Н., Латышева И. В., Вологжина С. Ж.]. –2019. ISBN 978-5-9624-1747-9
132. Елтай А.Ф., Нарбаева К.Т. Ветровое волнение в казахстанской части Каспийского моря // Международная конференция студентов и молодых ученых «Фараби элемі», 6-8 апреля 2023 г.
133. Лебедев С.А. Спутниковая альтиметрия // Шестая международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 2-6 мая, 2015 г.
134. Мизяюк А.И., Коротаев Г.К. Спутниковые данные для исследования динамикм поверхностного слоя Черного моря: альтиметрия на регулярной сетке и ИК-изображения высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал, там 35 №3, 2019 г. - С. 233-247.
135. Soomere T., Keevallik S. Anisotropy of moderate and strong winds in the Baltic proper // Oceanologia, 53 (1-TI), 2011. - P. 335–371.
136. Open Altimeter Database. [Электронный ресурс]. URL: <https://openadb.dgfi.tum.de/en/> (дата обращения: 15.05.2020).
137. The Radar Altimeter Database System. [Электронный ресурс]. URL: <http://rads.tudelft.nl/rads/rads.shtml> (дата обращения: 15.05.2020).
138. AVISO+. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html> (дата обращения: 15.05.2020).
139. Jet Propulsion Laboratory. [Электронный ресурс]. URL: <https://podaac.jpl.nasa.gov/datasetlist?ids=Keywords&values=Oceans:Ocean%20Waves&view=list> (дата обращения: 15.05.2020).
140. Романов А.А. Анализ основных тенденций развития спутниковых альтиметров: «подрывные» или эволюционные технологии? // Ракетно-

космическое приборостроение и информационные системы. 2018, том 5, выпуск 47 - С. 3-13.

141. Гордеева С.М., Шевчук О.И. Руководство по статистической обработке глобальных архивов информации (на примере альтиметрических данных). СПб.: РГГМУ, 2013. – 44 с.

142. Scharroo R., Leuliette E.W, Lillibridge J.L., Byrne D., Naeije M. C., Mitchum G.T. RADS: Consistent multi-mission products // Proc. of the Symposium on 20 Years of Progress in Radar Altimetry, Venice, 20-28 September 2012, Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA SP-710, 2013. – P. 4.

143. Ocean Wave Model – ECWAM. [Электронный ресурс]. URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/FUG/2.2+Ocean+Wave+Model+-+ECWAM> (дата обращения: 15.07.2020).

144. Московский физико-технический институт. Численное моделирование. [Электронный ресурс]. URL: https://mipt.ru/education/chair/theoretical_mechanics/laboratory/couro/chisl.php (дата обращения: 20.05.2021).

145. Пермяков П.С., Репин О.И. Математическое моделирование физических процессов // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – № 6. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19442>

146. Литвенко К.В., Пригарин С.М. Численные стохастические модели поверхности морского волнения и гигантских океанических волн // Сибирский журнал вычислительной математики. 2014. Т. 17, № 4. – С. 349-361.

147. Экхайден. MIKE 21 SW. [Электронный ресурс]. URL: <https://echyden.ru/moduli/moduli-programmy-mike-21-/mike-21-sw/> (дата обращения: 20.03.2022).

148. Григорьева В.Г., Гулев С.К., Шармар В.Д. Верификация глобальной спектральной волновой модели WAVEWATCH III по данным попутных судовых наблюдений //Океанология, 2020, том 60, №1. С. 14-26.

149. Медведева А.Ю., Мысленков С.А., Медведев И.П., Архипкин В.С., Кречик В.А., Добролюбов С.А. Моделирование ветрового волнения в Балтийском море на прямоугольной и неструктурированной сетках на основе реанализа NCEP-CFSR // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 362. - С. 37-54.

150. Алексеев Д.В., Фомин В.В., Иванча Е.В., Харитонов Л.В., Черкесов Л.В. Математическое моделирование ветрового волнения в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2012. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-etrovogo-volneniya-v-sevastopolskoj-buhte> (дата обращения: 02.11.2022).

151. Торопов П. Мысленков С.А., Самсонов Т. Численное моделирование новороссийской боры и связанного с ней ветрового волнения // Vestnik Moskovskogo Unviersiteta, Seriya Geografiya, 2013, №2. С. 38-46.

152. Ивкина Н.И., Галаева А.В. Прогнозирование ветрового волнения на Каспийском море с помощью модели SWAN. Гидрометеорология и экология, №2, 2017. С. 36-45.
153. Гидрометеорологические исследования Каспийского моря. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kazhydromet.kz/ru/kaspiyskoe-more/gidrometeorologicheskie-issledovaniya-kaspiyskogo-morya> (дата обращения: 01.02.2022).
154. Yeltay A., Ivkina N.I. Research of wave processes in the Caspian Sea based on surface wind fields and wave spectral model SWAN // 17th CAS-TWAS-WMO Forum that held in Beijing from September 17th to 21st, 2018. – 44 p.
155. Yeltay A., Ivkina N.I. Research of wave processes in the Caspian Sea based on surface wind fields and wave spectral model SWAN // International Symposium on Water and Land Resources in Central Asia. 9-11 October 2018, Almaty. – 54 p.
156. SWAN user manual. Delft University of Technology. 2015. - 135 p.
157. SWAN. Scientific and technical documentation. Delft University of Technology. 2020. - 149 p.
158. NC STATE UNIVERSITY. SWAN+ADCIRC. [Электронный ресурс]. URL: <https://ccht.ccee.ncsu.edu/swanadcirc/> (дата обращения: 15.07.2021).
159. AQUAVEO. ADCIRC. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aquaveo.com/software/sms-adcirc> (дата обращения: 15.07.2021).
160. Triangle. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html> (дата обращения: 15.07.2021).
161. EASYMESH. [Электронный ресурс]. URL: https://web.mit.edu/easymesh_v1.4/www/easymesh.html (дата обращения: 15.07.2021).
162. Anderson W.K. A Grid Generation and Flow Solution Method for the Euler Equations on Unstructured grids // Journal of Computational Physics, 1994. Vol. 110. - P. 23-38
163. GEBCO. [Электронный ресурс]. URL: <https://download.gebco.net/> (дата обращения: 15.09.2021).
164. Яицкая Н.А. Адаптация спектральной волновой модели SWAN к условиям бассейна Каспийского моря // Окружающая среда и человек. Современные проблемы генетики, селекции и биотехнологии. - С. 255-258.
165. Елтай А.Ф., Нарбаева К.Т. Анализ гидрометеорологических характеристик в районе порта Актау // Материалы международной конференции студентов и молодых ученых «Фараби элемі», Алматы, 6-8 апреля 2022 г.
166. Елтай А.Ф., Ивкина Н.И., Васенина Е.И., Наурызбаева Ж.К., Шишкина Г.М. Прогнозирование гидродинамических процессов с использованием модели Mike Zero (на примере порта Актау) // Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии) («Опасные явления – IV») памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова: материалы IV

Международной научной конференции (г. Ростов-на-Дону, 5–9 сентября 2022 г.). – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2022. – 440 с. – ISBN 978-5-4358-0239-9.

167. Елтай А.Ф., Ивкина Н.И. Моделирование ветрового волнения у порта Актау // Материалы международной научной конференции «Изменение климата в регионе Каспийского моря», 27-28 октября 2021 г. С. 157-158.

168. Yeltay A., Ivkina N., Narbayeva K. Verification of the results of SWAN model for water are near the port Aktau // International journal of GEOMATE. 2023. Vol.25. Issue 109. PP. 77-84.

169. Сахаева А.К., Сахай А.К., Кусембаева К.К., Елтай А.Ф. Сравнительный анализ наблюдательных данных с данными спутниковой альтиметрий Jason1 и SARAL в портах Актау и Кулалы Каспийского моря // Конференция Ломоносов – 2019, Москва, 2019 г.

170. Елтай А.Ф., Нарбаева К.Т. Ветровые характеристики Каспийского моря // Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ЭЛЕМИ», Алматы, 8-11 апреля 2019 г., 219- 223 стр.

171. Фрейзер Дэвидсон, Эндрю Робертсон, Фредерик Витар, Энтони Ри, Мишель Жан, Андреас Шиллер, Томас Дж. Кафф, Сара Граймс, Юнха Лим, Эстель де Конинг, Пейлян Ши. Прогнозирование океана – моделирование для будущего // Bulletin WMO, Vol 70 (1) – 2021.

172. Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nasa.gov/nex/gddp> (дата обращения: 01.02.2023).

173. Кодекс о недрах и недропользовании Республики Казахстан от 27 декабря 2017 года № 125-VI ЗРК. [Электронный ресурс]. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1700000125> (дата обращения: 01.05.2022).

174. Экологический Кодекс Республики Казахстан от 2 января 2021 года № 400-VI ЗРК. [Электронный ресурс]. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2100000400> (дата обращения: 01.05.2022).

175. Приказ Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан от 10 июня 2019 года № 381. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 14 июня 2019 года № 18845. Об утверждении Правил плавания в территориальных водах Республики Казахстан [Электронный ресурс]. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1900018845> (дата обращения: 01.05.2022).

176. Атлас районирования морей и океанов для гидрометеорологического обеспечения морской деятельности. Москва: ОАО «Фабрика офсетной печати», 2009. – 43 с.

177. Закон РК от 2 июля 2003 г. № 457 «О ратификации Соглашения между Республикой Казахстан и Азербайджанской Республикой о разграничении дна Каспийского моря между Республикой Казахстан и Азербайджанской Республикой и Протокола к Соглашению между Республикой Казахстан и Азербайджанской Республикой о разграничении дна Каспийского моря между Республикой Казахстан и Азербайджанской Республикой».

[Электронный ресурс]. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z030000457_ (дата обращения: 01.04.2023).

178. Закон РК от 14 ноября 2002 г. №356 «О ратификации Соглашения между Республикой Казахстан и Российской Федерацией о разграничении дна северной части Каспийского моря в целях осуществления суверенных прав на недропользование и Протокола к Соглашению между Республикой Казахстан и Российской Федерацией о разграничении дна северной части Каспийского моря в целях осуществления суверенных прав на недропользование». [Электронный ресурс]. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z020000356_ (дата обращения: 01.04.2023).

179. Закон РК от 20 июля 2015 г. №335-V ЗРК «О ратификации Соглашения между Республикой Казахстан и Туркменистаном о разграничении дна Каспийского моря между Республикой Казахстан и Туркменистаном». [Электронный ресурс]. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1500000335> (дата обращения: 01.04.2023).

180. Дробот Г.А., Кочеткова Е.В. Экологические проблемы как глобальная угроза безопасности // Вестник Московского университета, Сер.18, социология и политология. – 2009, №3. – С. 61-73.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

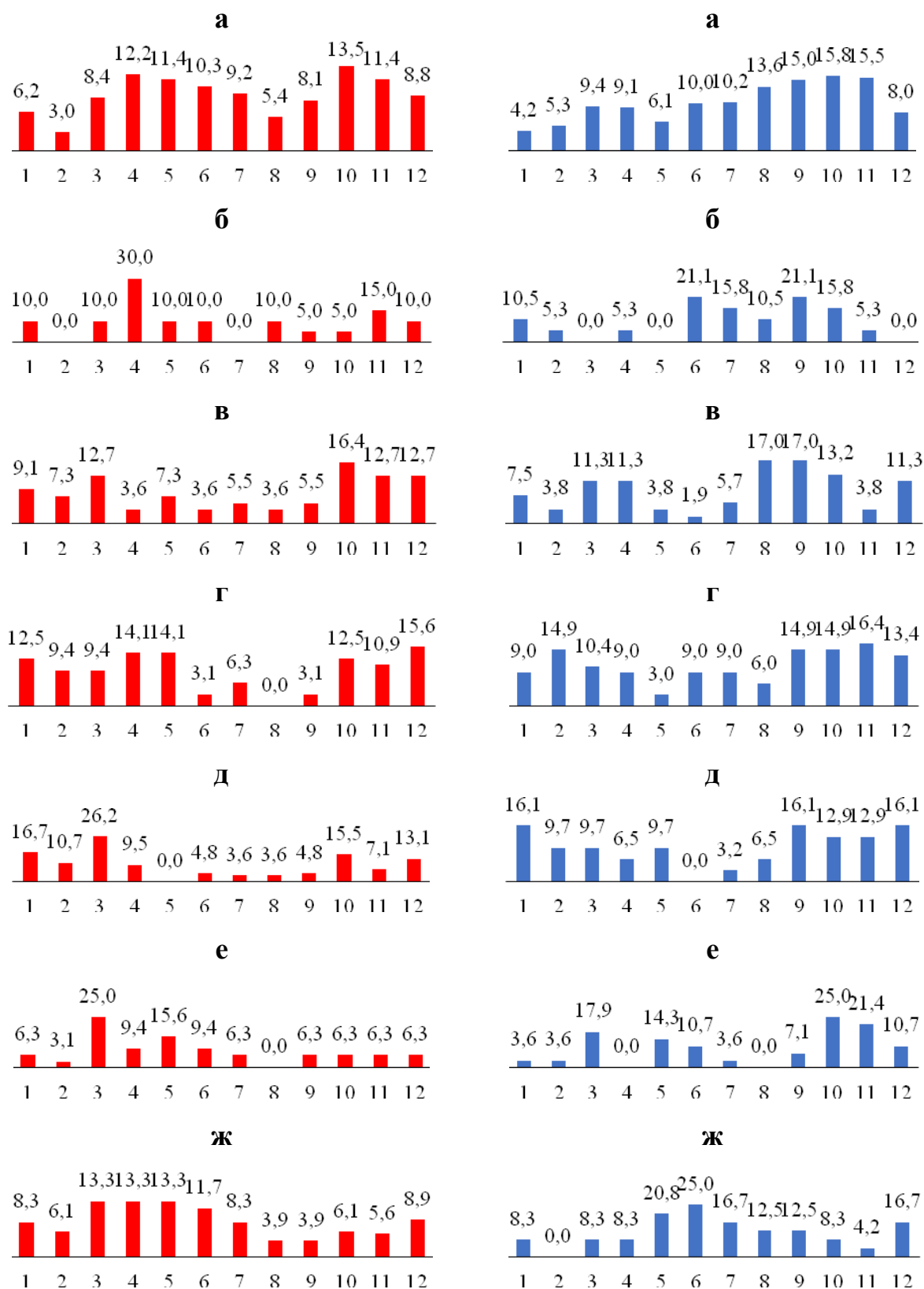


Рисунок А.1 - Повторяемость нагонов (красный) и сгонов (синий) по месяцам в среднем многолетнем разрезе: а) Пешной; б) Жанбай; в) Кулалы, остров; г) Форт-Шевченко; д) Саура; е) Актау; ж) Фетисово

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

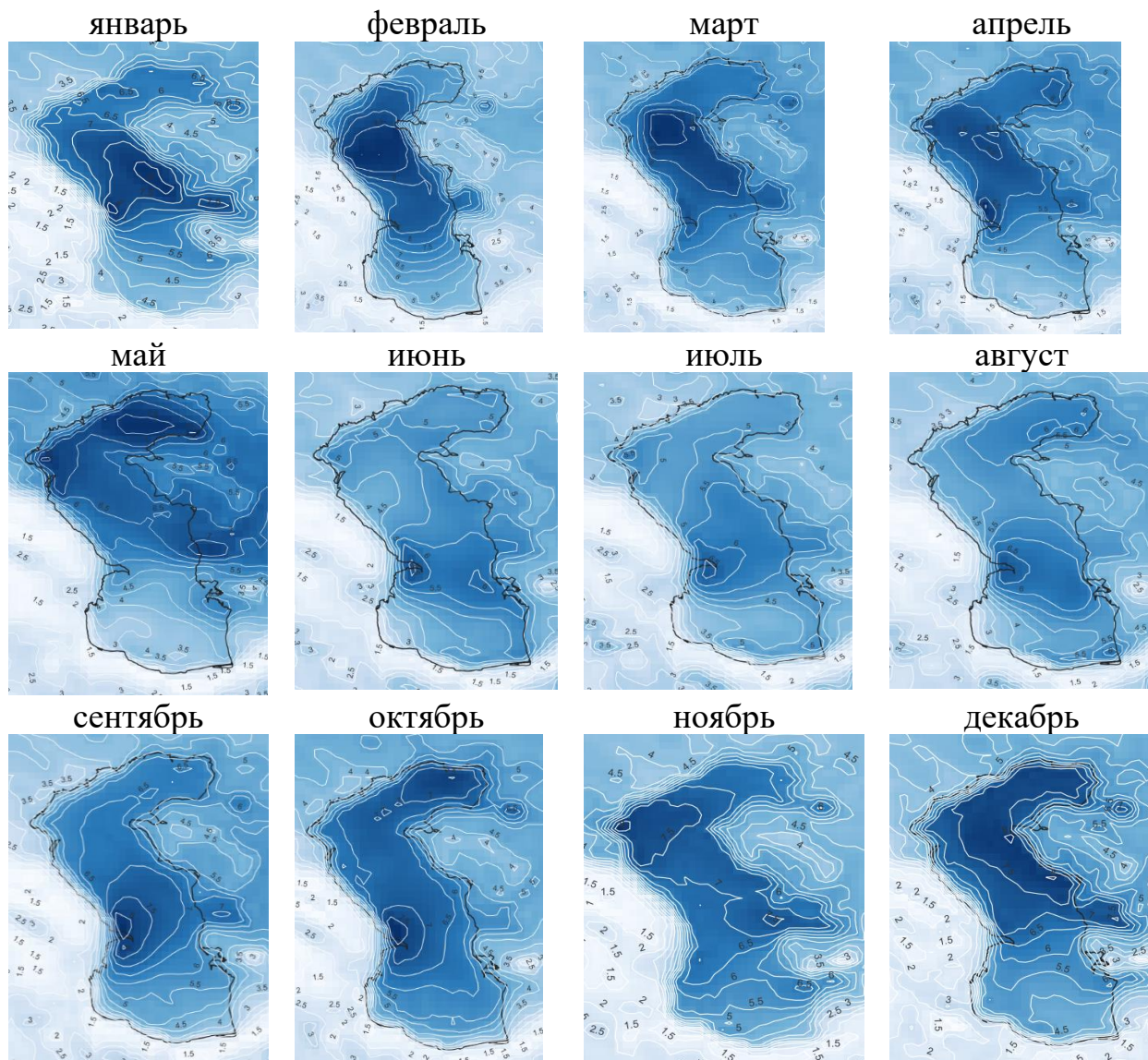


Рисунок Б.1 – Распределение скорости ветра по данным реанализа ERA5 на акватории Каспийского моря

Таблица Б.1 - Повторяемость направления ветра и штилей по месяцам, %

Направление, румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	шт
М-II Пешной (1944–2021 гг.)									
Январь	11.2	8.4	30.2	9.4	8.3	7.3	10.2	5.5	9.5
Февраль	10.8	7.3	30.5	8.4	8.0	6.3	12.8	6.0	10.0
Март	10.7	7.3	28.7	8.2	8.9	7.8	12.3	5.7	10.3
Апрель	11.1	6.7	24.5	9.7	9.7	9.7	12.6	5.4	10.7
Май	12.1	6.8	19.8	8.6	8.5	10.7	14.2	6.8	12.5
Июнь	14.4	6.0	11.5	6.0	8.5	12.7	19.4	7.4	14.0
Июль	14.6	5.6	9.1	4.4	7.3	13.4	22.0	8.4	15.2
Август	15.3	6.4	13.3	6.7	8.6	9.5	17.3	8.1	14.8
Сентябрь	12.6	5.7	17.1	9.1	8.7	7.7	16.2	7.8	15.0
Октябрь	10.3	5.3	19.1	10.7	9.1	6.4	16.7	8.3	14.2
Ноябрь	10.2	7.7	25.3	11.2	8.6	5.4	12.3	6.9	12.4
Декабрь	9.2	6.4	30.1	10.7	8.1	6.2	12.9	6.2	10.3
МГ-III Кулалы остров (1980–2021 гг.)									
Январь	10.0	13.3	29.0	11.7	4.2	6.0	9.7	9.7	6.5
Февраль	9.2	13.2	31.5	9.8	5.4	5.2	10.5	9.2	6.0
Март	11.3	16.6	21.7	9.1	7.6	8.5	12.0	8.4	4.7
Апрель	9.9	14.4	16.6	8.3	10.0	11.2	13.6	10.2	5.8
Май	11.2	15.6	14.8	6.1	7.9	10.4	15.1	12.5	6.4
Июнь	18.4	15.8	12.5	3.9	5.3	9.3	14.7	11.7	8.5
Июль	19.3	21.4	10.5	2.6	2.9	6.4	14.7	14.0	8.2
Август	15.2	20.9	16.1	5.5	3.9	6.2	10.6	12.2	9.3
Сентябрь	12.8	18.2	20.4	8.9	5.6	5.0	9.9	10.7	8.4
Октябрь	12.6	11.4	27.3	11.6	6.1	4.2	7.9	11.0	7.8
Ноябрь	14.4	12.2	29.7	11.5	4.7	3.5	9.1	8.7	6.2
Декабрь	11.3	10.6	30.1	11.3	3.1	4.1	12.9	9.3	7.4
МГ-I Форт-Шевченко (1992-2021 гг.)									
Январь	19.8	18.1	17.5	16.9	3.5	2.7	7.2	9.7	4.6
Февраль	17.6	16.1	16.0	18.0	5.8	3.3	9.4	8.9	5.0
Март	18.3	13.1	12.3	17.8	7.8	4.4	11.4	9.4	5.5
Апрель	20.3	12.1	9.7	14.8	9.4	6.2	10.7	10.1	6.6
Май	21.3	13.0	9.0	11.1	8.4	7.8	10.2	12.4	6.9
Июнь	26.7	12.4	7.7	6.4	7.1	6.2	13.9	12.3	7.3
Июль	29.5	13.4	7.4	4.8	5.1	4.3	12.5	15.4	7.4
Август	25.9	16.5	9.4	9.1	5.3	3.3	9.3	13.5	7.7
Сентябрь	23.4	15.7	14.1	13.9	5.6	3.2	7.5	10.5	6.0
Октябрь	17.1	15.2	14.6	21.9	6.4	2.1	6.5	11.1	5.1
Ноябрь	18.6	16.4	17.4	21.0	3.8	2.0	5.9	10.9	4.0
Декабрь	16.3	17.1	18.5	19.9	3.2	2.7	8.6	9.9	3.9
МГ-II Актау (1961–2021 гг.)									
Январь	14.4	12.1	34.3	18.4	2.9	1.6	6.0	7.7	2.6
Февраль	14.2	13.1	31.5	17.7	3.7	1.8	7.5	7.9	2.6
Март	12.7	10.5	21.8	17.1	7.2	3.9	12.2	11.7	2.9
Апрель	10.4	9.1	16.7	13.9	9.5	6.7	18.3	11.1	4.2
Май	10.8	9.4	12.8	8.5	9.3	8.8	24.0	11.2	5.3

Продолжение таблицы Б.1

Направление, румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	шт
Июнь	14.2	8.0	8.6	6.0	7.5	7.9	27.9	14.2	5.7
Июль	17.6	10.2	7.0	4.0	5.3	6.3	27.5	15.5	6.5
Август	15.5	12.4	11.4	7.1	6.8	6.2	21.0	13.2	6.4
Сентябрь	15.7	11.7	19.0	11.9	7.6	4.6	13.7	10.0	5.8
Октябрь	13.9	11.8	26.6	15.8	6.0	3.3	8.9	9.3	4.4
Ноябрь	14.2	12.8	31.8	19.2	4.3	1.9	5.3	7.2	3.4
Декабрь	13.5	13.3	35.6	19.6	2.2	1.6	4.8	6.7	2.7
МГП-II Песчаный (2009–2021 гг.)									
Январь	9.7	21.6	23.3	28.2	1.0	1.6	4.7	9.6	0.3
Февраль	8.6	22.5	24.8	24.6	2.1	2.6	3.3	11.3	0.1
Март	7.1	15.8	13.9	25.5	6.4	4.2	8.4	18.3	0.4
Апрель	5.7	16.0	11.3	21.6	7.7	6.5	11.5	19.3	0.6
Май	8.4	15.5	11.4	14.7	8.1	10.8	13.3	17.8	0.0
Июнь	11.2	17.6	8.5	11.7	5.4	6.9	16.2	22.4	0.2
Июль	11.6	17.7	8.5	11.0	3.7	7.5	14.4	25.7	0.0
Август	11.6	16.9	11.6	12.5	6.5	6.9	10.9	22.3	0.7
Сентябрь	10.2	16.4	15.9	21.4	6.0	4.8	5.8	18.4	1.0
Октябрь	8.1	19.8	19.9	26.9	4.6	3.8	3.9	12.8	0.3
Ноябрь	8.3	20.3	26.5	29.2	3.4	2.1	2.4	7.6	0.3
Декабрь	7.9	18.5	27.5	27.6	1.3	2.6	4.3	9.7	0.6
МГП-II Курыйк (2009–2021 гг.)									
Январь	14.9	13.4	25.8	23.1	6.5	2.7	3.9	7.8	1.9
Февраль	12.3	11.6	26.5	26.0	5.3	3.5	4.0	8.5	2.4
Март	13.3	7.3	14.4	21.8	9.7	6.9	10.1	12.6	3.9
Апрель	11.2	6.0	11.7	20.2	9.8	9.8	12.2	15.3	3.7
Май	10.1	8.5	11.7	15.7	6.8	11.4	14.6	15.2	6.0
Июнь	17.8	11.4	13.1	9.5	4.4	7.8	17.4	13.5	5.1
Июль	18.6	12.6	9.5	8.4	4.5	8.3	15.7	16.7	5.8
Август	17.2	8.6	13.8	11.8	4.3	9.1	14.7	11.4	9.1
Сентябрь	17.6	12.3	17.9	16.6	5.3	8.5	6.6	8.6	6.6
Октябрь	15.1	10.3	24.5	21.4	6.5	5.0	5.3	7.4	4.5
Ноябрь	13.0	11.0	28.3	24.6	7.2	2.4	3.6	6.3	3.6
Декабрь	10.6	9.0	30.0	25.7	5.5	2.8	4.2	7.5	4.7
МГП-II Фетисово (2010–2021 гг.)									
Январь	6.0	28.9	26.9	18.4	5.3	4.1	3.2	7.2	0.0
Февраль	7.7	25.0	27.3	17.8	5.3	4.8	4.1	8.0	0.0
Март	5.4	19.9	21.0	15.0	6.5	14.0	9.9	8.4	0.0
Апрель	4.6	14.5	19.3	15.9	7.9	15.5	14.3	7.9	0.0
Май	3.5	13.2	18.9	16.4	5.2	17.8	18.2	6.7	0.0
Июнь	6.2	14.8	18.2	13.6	3.1	13.9	21.2	9.0	0.0
Июль	5.5	15.5	18.6	14.5	3.2	13.3	17.7	11.5	0.1
Август	5.8	21.7	17.9	12.8	2.8	11.1	14.4	13.5	0.0
Сентябрь	6.2	20.9	20.8	14.4	3.6	10.8	10.5	12.8	0.0
Октябрь	7.8	21.9	26.8	16.6	5.6	7.0	6.2	8.1	0.0
Ноябрь	5.8	21.0	30.1	23.3	5.5	3.9	3.6	6.8	0.0
Декабрь	5.5	23.3	30.8	20.6	5.4	3.6	4.7	6.1	0.0

Таблица Б.2 - Количество случаев с различным направлением ветра по годам

Направление, румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	ШТ
Пешной (1944–2021 гг.)									
1944	219	95	466	103	110	111	229	98	29
1945	145	67	306	94	125	186	330	142	64
1946	189	88	375	106	133	118	334	80	36
1947	179	115	356	120	105	144	286	92	63
1948	206	81	298	115	170	156	274	87	57
1949	203	73	446	77	136	87	344	81	13
1950	191	91	418	94	129	131	301	83	21
1951	230	98	435	94	153	86	250	83	30
1952	174	104	496	89	135	94	247	101	23
1953	228	101	317	105	133	125	326	98	27
1954	199	103	339	87	98	66	187	62	75
1955	242	98	315	68	109	129	197	68	233
1956	196	99	327	107	155	122	290	107	61
1957	160	89	322	175	169	101	268	121	55
1958	221	76	323	135	124	87	324	109	60
1959	214	118	371	112	115	62	303	95	69
1960	176	112	358	178	86	76	249	91	137
1961	212	102	314	125	118	115	310	98	65
1962	178	101	326	164	140	64	298	103	73
1963	171	100	282	156	77	98	232	121	99
1964	126	44	208	49	122	39	242	54	88
1965	190	35	205	71	135	71	222	38	369
1966	129	83	308	155	100	87	137	59	381
1967	181	87	299	189	115	105	204	88	192
1968	185	59	435	86	142	80	180	78	212
1969	191	139	329	156	118	147	203	92	84
1970	162	95	349	140	114	136	234	88	136
1971	172	63	304	180	143	125	205	76	190
1972	233	97	238	188	135	119	185	103	163
1973	111	81	193	138	130	165	295	110	232
1974	115	89	338	156	105	105	168	76	305
1975	173	107	224	140	157	87	180	64	326
1976	219	138	370	85	151	81	150	67	203
1977	176	66	281	88	228	23	255	87	256
1978	162	69	279	110	193	111	247	94	192
1979	210	77	376	84	158	101	229	60	163
1980	177	62	390	107	133	108	221	89	175
1981	185	59	435	86	142	80	180	78	212
1982	180	50	294	116	195	109	265	62	182
1983	129	38	239	92	223	131	280	86	241
1984	201	100	442	79	122	68	156	59	237
1985	193	77	332	82	128	86	262	67	232
1986	242	61	318	89	137	69	235	74	233

Продолжение таблицы Б.2

Направл ение, румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	ШТ
1987	219	36	355	51	153	54	271	53	252
1988	142	45	476	50	134	51	265	58	240
1989	98	50	310	88	153	95	276	72	299
1990	143	32	213	90	135	147	261	94	342
1991	150	54	327	59	82	93	256	80	355
1992	162	57	304	106	116	90	274	69	284
1993	121	82	301	86	96	164	273	86	249
1994	125	79	317	107	126	146	258	99	192
1995	96	112	279	234	73	142	160	136	200
1996	123	216	351	161	33	105	98	107	236
1997	83	135	108	241	31	224	117	210	202
1998	91	176	134	175	55	186	82	191	257
1999	55	145	103	200	37	196	95	135	359
2000	88	163	102	186	53	213	91	197	282
2001	74	165	148	231	40	188	95	210	254
2002	96	163	94	194	48	215	82	198	308
2003	125	199	149	171	59	191	102	137	299
2004	147	92	211	141	98	222	179	46	286
2005	239	80	375	60	96	119	201	33	242
2006	245	58	305	89	117	155	193	30	250
2007	132	111	345	86	140	153	195	106	165
2008	174	91	333	72	103	174	203	129	152
2009	168	107	383	103	89	172	153	147	110
2010	213	127	413	123	104	97	144	131	100
2011	146	98	287	97	130	197	209	167	127
2012	143	90	330	172	126	152	167	117	164
2013	142	52	214	206	146	172	211	150	160
2014	194	77	326	138	148	130	175	104	153
2015	185	72	269	121	150	187	236	151	88
2016	170	86	221	139	121	141	216	109	261
2017	140	83	305	135	142	129	221	99	206
2018	225	143	319	115	121	116	185	89	143
2019	191	139	197	126	183	120	188	129	185
2020	182	128	266	140	142	138	204	114	143
2021	172	102	295	145	159	139	188	116	139
Кулалы остров (1980–2021 гг.)									
1980	60	14	46	14	10	5	24	12	0
1981	52	6	79	10	10	4	26	26	4
1982	18	15	17	14	15	7	18	7	37
1983	30	3	40	14	14	2	16	17	1
1984	42	11	90	34	5	1	23	7	8
1985	75	21	64	20	36	8	45	19	20
1986	47	1	34	13	15	0	4	2	2
1987	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1988	108	14	48	20	43	52	56	87	7
1989	114	20	38	24	104	74	48	98	4
1990	38	68	33	65	2	80	26	102	4

Продолжение таблицы Б.2

Направление, румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	ШТ
1991	61	72	75	53	22	50	23	58	17
1992	110	45	149	65	57	15	80	63	16
1993	136	135	273	47	114	97	185	122	267
1994	111	150	196	72	50	82	146	138	254
1995	40	310	100	108	28	86	84	235	291
1996	20	288	69	43	7	24	21	41	68
1997	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1998	38	201	87	65	27	58	46	134	102
1999	52	172	137	90	38	86	99	121	230
2000	17	263	74	137	8	86	52	182	194
2001	42	387	43	317	8	185	46	286	145
2002	37	287	38	246	19	180	25	264	198
2003	42	313	155	207	23	158	43	271	153
2004	183	223	199	182	49	116	150	109	194
2005	256	294	270	97	42	89	147	47	184
2006	236	241	278	122	68	64	175	48	184
2007	191	149	404	196	77	82	164	127	24
2008	185	134	402	123	109	55	180	137	33
2009	159	202	446	79	80	76	174	140	50
2010	158	238	460	135	77	64	132	112	47
2011	157	272	247	112	67	116	233	188	64
2012	166	200	429	125	81	129	166	149	13
2013	201	189	273	141	87	72	260	223	12
2014	178	223	466	111	77	78	172	132	11
2015	189	191	444	89	64	79	238	143	22
2016	264	116	400	52	125	65	306	113	23
2017	230	154	426	88	117	97	230	111	6
2018	322	183	529	31	121	42	176	55	1
2019	361	181	418	48	151	55	198	46	4
2020	243	126	488	52	128	51	271	102	1
2021	303	148	440	50	127	74	239	77	0
Форт-Шевченко (1992–2021 гг.)									
1992	41	23	62	20	5	2	11	11	1
1993	225	58	256	122	158	86	181	114	110
1994	316	66	196	167	168	52	158	103	124
1995	171	138	51	359	53	63	65	239	175
1996	147	279	83	345	39	62	50	137	97
1997	178	178	49	312	54	89	71	232	75
1998	156	135	54	228	38	45	41	158	46
1999	132	153	26	257	35	108	43	163	89
2000	180	182	81	252	67	92	45	197	108
2001	158	239	29	353	39	103	47	220	138
2002	170	239	33	269	36	112	48	237	152
2003	132	323	31	262	35	87	35	234	209
2004	304	163	114	288	74	97	159	89	145
2005	451	114	253	160	125	43	145	30	121
2006	414	103	286	150	136	28	196	30	91

Продолжение таблицы Б.2

Направление, румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	ШТ
2007	407	220	250	136	32	23	223	116	25
2008	488	280	231	38	33	4	183	130	34
2009	392	229	276	117	43	11	183	155	30
2010	352	333	266	60	31	14	140	152	97
2011	472	300	196	12	21	8	224	202	18
2012	407	411	245	2	3	1	164	204	20
2013	429	381	157	5	1	3	175	260	46
2014	184	312	154	282	49	82	96	191	102
2015	321	336	188	86	18	26	164	185	135
2016	360	83	250	158	222	46	219	101	25
2017	300	93	239	314	172	50	186	97	7
2018	275	183	315	277	157	47	94	96	15
2019	316	164	236	255	193	70	118	100	7
2020	278	89	275	283	177	78	133	141	8
2021	280	132	197	272	143	67	164	136	69
Актау (1961–2021 гг.)									
1961	251	99	254	104	104	43	207	155	99
1962	204	81	337	153	87	37	220	165	176
1963	266	103	364	121	81	21	237	135	136
1964	214	105	289	160	89	53	257	220	77
1965	187	134	348	140	100	56	198	190	107
1966	193	121	387	202	85	68	184	130	90
1967	265	105	374	152	88	57	202	169	48
1968	238	117	365	210	121	61	111	154	87
1969	234	106	380	165	137	52	149	132	109
1970	261	130	370	156	106	23	210	143	61
1971	244	131	397	149	98	39	197	114	91
1972	237	125	343	156	107	48	198	95	124
1973	252	77	256	154	104	42	264	147	160
1974	206	119	449	128	61	38	214	120	125
1975	248	155	382	166	87	40	184	121	77
1976	232	169	319	159	102	29	165	110	55
1977	234	164	286	173	116	50	187	151	99
1978	263	96	340	144	137	57	233	127	63
1979	259	107	423	165	126	40	170	67	103
1980	305	57	402	152	126	37	158	67	163
1981	253	76	447	81	97	37	273	112	84
1982	279	81	425	73	103	38	295	94	72
1983	226	165	247	103	103	113	261	209	32
1984	147	182	305	247	53	56	198	148	104
1985	240	131	302	165	104	60	247	174	5
1986	261	175	305	210	103	65	163	178	0
1987	219	158	288	243	106	49	120	190	87
1988	188	138	301	250	57	61	220	127	117
1989	143	129	283	195	74	75	317	210	39
1990	176	146	248	190	61	105	259	227	48
1991	181	202	300	180	55	99	234	162	47

Продолжение таблицы Б.2

Направление, румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	ШТ
1992	119	185	276	213	72	84	305	181	25
1993	80	187	279	236	73	87	247	203	68
1994	93	184	242	306	83	82	218	187	65
1995	62	178	263	340	62	63	250	181	61
1996	38	273	159	382	24	67	144	181	24
1997	27	170	65	239	20	65	132	195	20
1998	31	161	82	292	23	54	116	187	12
1999	35	189	72	291	25	84	141	186	26
2000	104	297	101	263	5	83	149	205	27
2001	83	243	111	410	19	121	128	271	44
2002	87	337	80	322	32	89	81	285	19
2003	97	346	109	332	43	100	80	264	15
2004	167	199	172	322	64	108	146	180	52
2005	219	211	236	248	66	63	176	169	55
2006	210	202	259	255	91	80	154	153	44
2007	166	205	253	170	80	95	227	150	32
2008	198	180	304	134	55	98	258	147	53
2009	184	231	352	114	42	104	238	142	32
2010	151	213	357	157	66	81	244	87	81
2011	170	194	294	128	88	120	239	137	44
2012	183	218	352	116	85	112	237	104	42
2013	179	177	301	150	74	120	281	137	34
2014	237	221	391	152	78	75	188	80	20
2015	304	215	163	216	98	86	127	215	19
2016	294	108	330	132	127	26	344	66	37
2017	261	94	456	92	163	31	288	46	24
2018	300	94	501	86	124	28	209	68	50
2019	312	99	409	87	137	32	295	47	41
2020	254	66	494	80	167	29	305	43	24
2021	270	100	453	109	133	23	311	41	19
Песчаный (2009–2021 гг.)									
2009	46	84	82	218	15	5	35	81	29
2010	89	137	138	508	48	52	73	248	35
2011	94	270	218	191	67	117	168	256	1
2012	79	409	369	143	72	65	140	178	0
2013	122	332	278	181	58	74	182	222	0
2014	167	317	267	314	68	60	77	175	0
2015	120	316	209	293	66	68	107	278	0
2016	153	325	191	289	68	65	76	297	0
2017	166	249	241	342	84	53	96	229	0
2018	147	267	294	322	67	74	95	193	1
2019	159	258	227	304	58	87	116	250	0
2020	107	134	285	367	81	90	149	249	0
2021	164	156	246	341	86	82	146	239	0
Курык (2009–2021 гг.)									
2009	97	131	218	184	19	26	72	238	44
2010	206	152	438	84	82	54	287	48	77

Продолжение таблицы Б.2

Направление, румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	ШТ
2011	119	52	230	54	73	35	151	42	14
2012	130	78	242	66	52	32	101	43	23
2013	203	131	195	278	106	73	147	235	79
2014	184	163	234	311	108	104	100	149	96
2015	230	148	261	265	105	89	145	165	43
2016	240	128	206	279	107	97	105	242	60
2017	195	135	196	386	92	124	96	171	65
2018	187	155	268	346	94	124	86	128	72
2019	248	175	215	292	70	119	121	107	111
2020	192	120	275	335	85	123	92	149	93
	214	164	252	313	91	116	108	156	45
Фетисово (2010–2021 гг.)									
2010	56	132	268	204	66	112	152	90	0
2011	106	238	216	276	52	261	116	186	0
2012	91	230	269	292	62	209	176	126	0
2013	28	272	231	346	52	286	102	137	0
2014	67	192	352	392	99	143	119	89	0
2015	73	283	330	269	102	103	150	148	0
2016	95	350	314	219	79	107	160	140	0
2017	59	369	368	203	70	94	172	125	0
2018	72	412	396	160	51	98	161	108	0
2019	101	452	342	116	53	128	150	115	1
2020	107	276	393	184	67	112	193	130	0
2021	139	208	454	181	90	70	196	122	0

Таблица Б.3 - Повторяемость различных сочетаний скорости ветра и штиля по направлениям, %

Диап зон, м/с	Направление															Штил ь	
	СС В	С	ССЗ	СВ	СВВ	В	ВЮВ	ЮВ	ЮЮВ	Ю	ЮЮЗ	ЮЗ	ЗСЗ	З	ЗЮЗ		СЗ
М II – Пешной (1944-2021 гг.)																	
0-1	0.50	1.10	0.56	1.20	0.64	1.25	0.48	0.78	0.24	0.45	0.32	1.05	0.44	0.87	0.39	1.27	12.2
2-3	1.11	1.73	1.07	2.46	1.72	2.52	1.44	2.15	0.72	1.08	1.07	2.47	1.10	1.69	1.20	2.20	
4-5	0.75	1.02	0.83	1.38	1.14	1.92	1.61	2.17	0.67	0.76	0.97	2.02	0.84	1.38	1.27	1.39	
6-7	0.44	0.63	0.54	0.76	0.73	1.41	1.41	1.59	0.39	0.35	0.55	1.42	0.63	0.90	1.01	0.90	
8-9	0.24	0.37	0.27	0.41	0.39	0.91	1.04	0.94	0.23	0.16	0.25	0.85	0.43	0.70	0.63	0.58	
10-11	0.09	0.15	0.15	0.16	0.15	0.47	0.66	0.50	0.08	0.05	0.11	0.39	0.23	0.36	0.30	0.29	
12-13	0.05	0.06	0.07	0.09	0.09	0.28	0.38	0.30	0.04	0.03	0.05	0.24	0.15	0.24	0.15	0.20	
14-15	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.16	0.14	0.11	0.01	0.01	0.02	0.10	0.07	0.09	0.06	0.06	
16-17	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.08	0.10	0.08	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.05	0.04	0.04	
18-20	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.04	0.07	0.05	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.04	0.02	0.02	
21-24			0.00	0.00		0.01	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
25-28						0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00		0.00	
МГ III – Кулды остров (1980-2021 гг.)																	
0-1	0.08	0.23	0.22	0.64	0.09	0.35	0.13	0.35	0.04	0.08	0.07	0.33	0.10	0.27	0.06	0.50	5.89
2-3	0.69	1.68	1.02	4.46	1.21	2.74	1.27	2.49	0.32	0.61	0.40	2.08	0.66	1.36	0.53	2.76	
4-5	0.63	1.72	0.93	4.65	1.39	3.40	1.50	2.69	0.31	0.61	0.45	1.91	0.73	1.54	0.45	2.74	
6-7	0.46	1.27	0.67	3.46	0.97	3.14	1.27	1.94	0.28	0.47	0.28	1.26	0.61	1.38	0.37	2.34	
8-9	0.23	0.68	0.50	1.84	0.59	1.63	0.71	1.27	0.13	0.34	0.18	0.87	0.47	1.00	0.30	1.58	
10-11	0.09	0.29	0.15	0.69	0.27	0.65	0.24	0.49	0.06	0.11	0.06	0.34	0.26	0.48	0.12	0.83	
12-13	0.02	0.05	0.03	0.18	0.10	0.23	0.10	0.13	0.03	0.06	0.02	0.12	0.12	0.24	0.03	0.36	
14-15	0.01	0.01	0.01	0.13	0.01	0.09	0.02	0.06	0.01	0.03	0.01	0.08	0.05	0.10	0.01	0.15	
16-17		0.01		0.04	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	0.01		0.05	0.01	0.07	0.01	0.07	
18-20		0.00	0.00	0.02	0.00	0.00		0.01				0.01		0.03		0.03	
21-24				0.00			0.01										
25-28												0.01					
МГ I – Форт-Шевченко (1992-2021 гг.)																	
0-1	0.51	0.88	0.37	1.10	0.33	0.38	0.20	0.65	0.18	0.23	0.11	0.25	0.32	0.36	0.09	0.71	5.78
2-3	1.73	4.62	1.34	4.68	1.36	1.72	0.80	3.78	0.56	0.82	0.44	1.50	1.26	1.75	0.37	3.76	

Продолжение таблицы Б.3

Диап а зон, м/с	Направление															Штил ь	
	СС В	С	ССЗ	СВ	ВСВ	В	ВЮВ	ЮВ	ЮЮВ	Ю	ЮЮЗ	ЮЗ	ЗСЗ	З	ЗЮЗ		СЗ
4-5	1.29	3.29	1.20	3.92	1.16	1.37	0.70	3.42	0.38	0.71	0.30	1.01	0.75	1.02	0.20	2.64	
6-7	0.79	1.87	0.62	2.69	0.85	0.92	0.52	2.73	0.33	0.41	0.21	0.58	0.52	0.73	0.11	1.60	
8-9	0.35	0.80	0.33	1.31	0.48	0.44	0.33	1.58	0.15	0.22	0.09	0.31	0.37	0.44	0.08	1.06	
10-11	0.15	0.40	0.10	0.74	0.18	0.20	0.16	1.17	0.12	0.12	0.02	0.20	0.18	0.31	0.02	0.69	
12-13	0.04	0.21	0.04	0.40	0.10	0.10	0.07	0.65	0.06	0.03	0.01	0.08	0.08	0.13	0.02	0.33	
14-15	0.04	0.12	0.02	0.37	0.05	0.08	0.05	0.59	0.06	0.03	0.01	0.07	0.06	0.11	0.00	0.28	
16-17	0.01	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.01	0.10	0.01	0.01		0.01	0.02	0.02		0.05	
18-20	0.01	0.04	0.00	0.08	0.01	0.01	0.01	0.11	0.01	0.01		0.03	0.01	0.01		0.07	
21-24		0.00		0.01				0.01	0.01			0.01		0.00		0.01	
25-28								0.00				0.00		0.00		0.00	
МГ II – Актау (1961-2021 гг.)																	
0-1	0.68	0.65	0.31	1.14	0.45	0.81	0.34	0.61	0.23	0.35	0.25	0.49	0.29	0.66	0.24	0.55	4.27
2-3	2.33	2.42	1.27	4.20	2.12	3.84	2.22	3.18	0.83	1.32	0.93	1.82	1.36	3.52	1.22	2.29	
4-5	1.48	2.14	1.13	2.22	1.26	3.84	3.19	3.45	0.70	0.79	0.45	0.80	1.98	2.86	0.63	2.33	
6-7	0.63	1.05	0.64	0.73	0.39	1.65	2.13	2.01	0.39	0.25	0.09	0.15	1.06	0.96	0.12	1.44	
8-9	0.19	0.46	0.32	0.25	0.10	0.55	0.88	0.96	0.18	0.08	0.01	0.06	0.48	0.34	0.06	0.76	
10-11	0.07	0.23	0.15	0.08	0.02	0.13	0.40	0.53	0.08	0.02	0.01	0.02	0.19	0.15	0.02	0.44	
12-13	0.01	0.06	0.07	0.01	0.01	0.04	0.11	0.17	0.03	0.01		0.01	0.11	0.06	0.01	0.24	
14-15	0.01	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.05	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03	0.00	0.11	
16-17	0.00	0.01	0.01	0.00		0.00	0.01	0.01	0.01	0.00			0.03	0.01	0.00	0.05	
18-20		0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00				0.02	0.01	0.00	0.02	
21-24								0.00						0.00		0.00	
25-28								0.00								0.00	
МГ II – Песчаный (2009-2021 гг.)																	
0-1	0.02	0.38		0.45	0.01	0.52	0.02	0.92	0.01	0.38	0.01	0.41		0.41	0.02	0.70	0.36
2-3	0.10	3.08	0.02	6.77	0.11	5.21	0.07	5.53	0.04	1.73	0.04	2.11	0.03	2.71	0.04	4.40	
4-5	0.10	3.36	0.04	9.05	0.11	6.26	0.10	6.09	0.01	1.42	0.03	1.72	0.03	2.43	0.06	5.08	
6-7	0.03	1.11	0.02	1.32	0.03	2.47	0.06	4.12	0.01	0.61		0.53	0.02	1.26	0.01	3.02	
8-9		0.53	0.02	0.42	0.02	1.47	0.07	3.48	0.02	0.31	0.01	0.20	0.04	0.85	0.02	2.33	
10-11		0.13	0.00	0.10		0.31	0.01	0.83	0.01	0.04		0.03	0.01	0.12		0.46	
12-13		0.03	0.01	0.03		0.11	0.01	0.25	0.01	0.02		0.01	0.01	0.09		0.19	
14-15		0.02	0.01	0.03		0.04		0.04				0.01	0.01	0.03		0.05	
16-17				0.01		0.02		0.02								0.01	
18-20		0.01						0.01					0.01			0.01	
21-24								0.01									
25-28								0.01									
Курык (2009-2021 гг.)																	
0-1	0.11	0.96	0.03	0.98	0.07	0.83	0.04	0.74	0.03	0.50	0.02	0.50	0.05	0.64	0.05	0.77	4.79
2-3	0.63	3.65	0.29	3.72	0.51	4.31	0.27	3.62	0.20	1.49	0.18	2.35	0.25	2.67	0.29	2.99	
4-5	0.40	3.77	0.26	3.35	0.40	5.66	0.38	4.63	0.12	1.43	0.10	2.42	0.21	2.95	0.29	3.01	
6-7	0.14	2.09	0.14	1.43	0.26	3.46	0.44	4.22	0.06	0.91	0.02	0.78	0.11	1.31	0.06	2.28	
8-9	0.02	1.18	0.05	0.48	0.06	1.28	0.15	3.04	0.03	0.61	0.02	0.29	0.07	0.33	0.02	1.20	
10-11	0.01	0.34	0.01	0.07	0.02	0.51	0.04	1.68		0.30	0.01	0.12	0.01	0.07	0.01	0.50	
12-13		0.13		0.04	0.01	0.12	0.02	0.61		0.22		0.02	0.01	0.01		0.14	
14-15		0.03		0.01		0.01	0.01	0.23		0.07		0.01		0.01		0.01	
16-17		0.01		0.01		0.01		0.01		0.03						0.01	
18-20				0.01		0.01		0.01		0.02		0.01					
21-24				0.01				0.01		0.01							
25-28								0.01									
Фегисово (2010-2021 гг.)																	
0-1		0.36		0.89	0.02	1.11	0.02	0.90		0.66	0.01	1.14		0.97	0.01	0.63	
2-3	0.09	1.43		6.90	0.05	7.68	0.05	5.41	0.01	1.74	0.03	3.76	0.03	3.04	0.06	2.25	0.09
4-5	0.04	1.49	0.01	6.91	0.08	7.20	0.03	4.89	0.01	1.17	0.03	2.97	0.03	3.44	0.06	2.86	0.04
6-7	0.03	1.06		3.50	0.02	3.70		2.91	0.01	0.77		1.32	0.02	1.66	0.02	1.72	0.03
8-9	0.03	0.60		1.43	0.02	1.78	0.02	1.65		0.31	0.01	0.70	0.01	0.90	0.02	0.92	0.03
10-11	0.01	0.30		0.46	0.01	0.75		0.65		0.14	0.01	0.15		0.32	0.01	0.28	0.01
12-13		0.13		0.17	0.01	0.19		0.18		0.05		0.04		0.05	0.01	0.15	
14-15	0.01	0.03		0.05	0.01	0.05		0.08		0.01		0.02		0.02		0.02	0.01
16-17				0.01		0.01		0.01		0.01						0.01	
18-20				0.01										0.01			

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Каталог волнения (высота волны более 2 м)

Таблица В.1 - Сведения о волнении по данным МГ-III Кулалы остров

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжительность, час
			скорость, м/с	направление, румб	
15.02.2002	2	3	15	ЮЗ	6
16.02.2002	2	3	15	СВ	6
17.02.2002	2	3	9	ЮЗ	6
31.03.2002	2	3	10	ЮЗ	6
08.04.2002	2	СЗ	18	СЗ	6
09.04.2002	2	3	19	СЗ	6
20.04.2002	2	В	17	СЗ	6
03.10.2002	2	С	10	С	6
22.10.2002	2	С	5	ЮВ	6
21.11.2003	3	3	16	ЮЗ	6
09.01.2004	2	3	9	ЮЗ	6
10.01.2004	2	3	14	З, ЮЗ	12
07.02.2004	2	3	8-9	СЗ, З	12
08.02.2004	2	3	8	З	6
16.02.2004	2	3	13-14	СЗ, З	12
29.02.2004	2	СЗ	7	ЮВ	6
07.03.2004	2	3	10-11	СЗ	12
08.03.2004	2	СЗ	8-12	СЗ	18
30.03.2004	2	СЗ	16	СЗ	6
31.03.2004	2	СЗ	6-16	СЗ	18
10.03.2005	2	3	6	ЮЗ	6
20.03.2005	2	3	8	З	6
28.04.2005	2	ЮЗ	1-2	ЮЗ	18
28.04.2005	2	ЮЗ	1	ЮЗ	6
18.06.2005	2	3	8-9	З, ЗСЗ	12
18.10.2005	2	СЗ	5	ЮВ	6
20.10.2005	2	3	5	З	18
21.10.2005	2	3	2-8	ЗСЗ	18
23.11.2005	2	СЗ	5-6	ССЗ	12
07.03.2006	2	Ю	4	ЮЮВ	6
06.12.2013	2	ЮЗ	5	ЮЮЗ	6
10.12.2013	2	Ю	4	ЮЮВ	6
13.12.2013	2	С	4	С	6
16.03.2016	2	3	17	З	6
25.11.2016	2	Ю	16	ЮЮВ	6

Таблица В.2 - Сведения о волнении по данным МГ-І Форт-Шевченко

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжительность, час
			Диапазон скоростей ветра	преобладающее направление	
26.03.1995	2	З	18	ЮЗ	6
08.04.1996	2	В	18	В	6
22.02.1999	2	З	24	ЮЗ	6
17.11.1999	2	СЗ	18	СЗ	6
25.01.2000	2.5	Ю	24	СЗ	6
16.02.2002	2	СЗ	14	СЗ	6
10.04.2003	2	СЗ	10	СЗ	6
17.02.2004	2	СЗ	8	СЗ	6
16.03.2013	2	СВ	20	С	6
17.03.2013	2	СВ	13-18	С	12

Таблица В.3 - Сведения о волнении по данным МГ Саура

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Продолжительность, час
14.09.2010	2	Ю	6
19.12.2011	2	ЮВ	18
20.12.2011	2	ЮВ	24
24.12.2011	2	ЮВ	6
26.12.2012	2	ЮВ	18
24.03.2013	2	ЮВ	6
14.05.2013	2	З	6
16.10.2013	2	ЮВ	6
18.10.2013	2	З	6
04.12.2013	2	З	12
10.12.2013	2	ЮВ	6
11.12.2013	2	З	6
14.12.2013	2	В	6
15.12.2013	2	З	18
16.12.2013	2	З	6
17.12.2013	2	З	6
17.01.2014	2	ЮВ	6
16.03.2014	2	З	18
06.04.2014	2	З	6
29.04.2014	2	ЮВ	18
30.04.2014	2	ЮВ	6
08.12.2014	2	ЮВ	24
24.12.2014	2	З	6
25.12.2014	2	З	6
30.12.2014	2	ЮВ	12
18.01.2015	2	З	6

Продолжение таблицы В.3

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Продолжи тельность, час
16.02.2015	2	3	6
01.03.2015	2	ЮВ	6
19.10.2015	2	ЮВ	6
03.11.2015	2	Ю	18
04.11.2015	2	3	18
11.11.2015	2	ЮВ	6
12.11.2015	2	ЮВ	12
14.11.2015	2	3	6
20.11.2015	2	ЮВ	6
21.11.2015	2	ЮВ	6
06.12.2015	2	3	6
08.12.2015	2	3	18
16.12.2015	2	3	18
25.12.2015	2	3	12
18.01.2016	2	ЮВ	18
19.01.2016	2	ЮВ	12
03.03.2016	2	ЮВ	6
16.03.2016	2	3	12
17.03.2016	2	3	12
18.03.2016	2	3	6
04.11.2016	2	ЮВ	12
11.12.2016	2	3	6
28.12.2017	2.5	ЮВ	12
13.12.2018	2.5	3	6
15.12.2018	2.5	3	6
16.01.2019	2	ЮВ	12
17.01.2019	2	ЮВ	6
18.02.2019	2	3	18
19.02.2019	2	3	18
20.02.2019	3	3	6
10.03.2019	2	ЮВ	12
11.03.2019	2	ЮВ	6
03.04.2019	2	3	6
20.12.2019	2	3	12
22.01.2020	2	3	12
26.01.2020	2	3	12
26.02.2020	2	3	
27.02.2020	2	ЮВ	6
28.02.2020	2	ЮВ	18
07.04.2020	2	3	12
21.11.2020	2	ЮВ	6
28.01.2021	2	ЮВ	12
22.02.2021	2	3	12

Примечание: в МГП Саура наблюдения за характеристиками ветра не ведутся.

Таблица В.4 - Сведения о волнении по данным МГ Актау

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжи тельность, час
			скорость, м/с	направление, румб	
25.09.1980	2.5	СЗ	9-13	ССЗ, СЗ	12
24.11.1980	2.5	З	10	З	6
03.02.1981	3	СЗ	16-20	СЗ, ССЗ	12
06.02.1982	2	СЗ	11	З	6
07.02.1982	2	З	14	З	6
04.11.1983	3.5	СЗ	15-16	ЗСЗ, ССЗ	12
10.10.1984	3.5	СЗ	16	СЗ	6
06.12.1985	4.5	СЗ	8	ЗСЗ	6
30.09.1986	2.5	Ю	8	ЮВ	6
04.11.1987	2	СЗ	11-12	З	12
12.08.1988	2.5	СЗ	8	СЗ	6
05.01.1989	2	СЗ	6	С	6
21.11.1989	2	С	5	С	6
25.11.1989	2	СЗ	9	СЗ	6
16.03.1990	2	З	5	СЗ	6
04.06.1990	2	СЗ	12	ЗСЗ	6
01.11.1990	2	СЗ	7	ЗСЗ	6
05.01.1991	3.5	З	8	З	6
08.02.1992	2	СЗ	4	З	6
11.02.1992	2	СЗ	14	ЗСЗ	6
16.11.1992	2	З	8	СЗ	6
26.11.1992	2	СЗ	7-8	СЗ	12
12.04.1993	2.5	СЗ	8	ЗСЗ	6
02.02.1994	2	СЗ	8-9	ЗСЗ	12
15.10.1994	2	З	7-8	СЗ	12
16.10.1994	2	СЗ	10	СЗ	6
26.03.1995	2.5	В	5	ЗЮЗ	6
27.03.1995	2.5	З	10	З	6
14.11.1995	2.5	З	10	З	6
17.12.1996	2	З	8-9	СЗ	12
26.01.1997	2.5	СЗ	4-7	СЗ	12
27.01.1997	2.5	СЗ	6-7	СЗ	12
29.01.1997	2.5	СЗ	7	СЗ	6
30.01.1997	2.5	СЗ	7	ЮЗ	6
31.01.1997	2.5	СЗ	7	З	6
10.04.1997	2.5	СЗ	12	СЗ	6
16.04.1997	2.5	СЗ	8	СЗ	6
11.11.1998	2.5	З	8	СЗ	6
22.02.1999	2.5	З	10	З	12
25.01.2000	2.5	ЮЗ	12	ЮВ	6
01.11.2001	2	СЗ	3-6	СЗ	24
03.11.2001	2	ЮЗ	5-6	Ю, ЮВ	6
03.02.2002	3	СЗ	10	СЗ	6
10.04.2003	3	СЗ	7	СЗ	6

Продолжение таблицы В.4

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжительность, час
			скорость, м/с	направление, румб	
10.12.2003	3	СЗ	6	СЗ	6
23.10.2004	3	СЗ	6	З	6
24.11.2004	3	СЗ	5	ЗСЗ	12
20.10.2005	3	СЗ	4	ЮВ	6
19.05.2006	3	СЗ	10	ЗСЗ	6
22.02.2007	3	ЮЗ	15	З	6
10.10.2008	3	СЗ	10	ЗСЗ	6
25.03.2013	2	СЗ	11	СЗ	6
04.12.2013	2	СЗ	9-13	ЗСЗ	12
11.12.2013	2	З	7	СЗ	6
15.12.2013	2	З	10-12	З	12
21.12.2013	2	В	4	В	6
30.03.2014	2	СЗ	10	СЗ	12
25.12.2015	2.5	СЗ	10	ЗСЗ	6
16.03.2016	2.7	СЗ	11	ЗСЗ	6
25.01.2017	2.2	ЮЗ	8	Ю	6
25.01.2021	2	ЮВ	7	ЮВ	6
28.01.2021	2	ЮВ	12	ЮВ	6

Таблица В.5 - Сведения о волнении по данным МГ Песчаный

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжительность, час
			скорость, м/с	направление, румб	
14.08.2009	4.5	З	6	З	6
04.10.2011	2	Ю	11	З	6
07.11.2011	2	С	10-11	С	12
12.11.2011	2	СВ	5	С	6
13.11.2011	2	СЗ	11-12	Ю	6
24.11.2011	2	СЗ	12	СЗ	6
06.12.2011	2	В	10	В	6
21.12.2011	2	В	13-14	В	12
28.12.2011	2	ЮЗ	9	З	6
30.12.2011	2	ЮВ	9	В	6
31.12.2011	2	В	12	В	6
06.01.2012	2	В	14-16	ЮВ, В	18
16.01.2012	2	ЮВ	11	ЮВ	6
04.12.2013	2.5	З	15	З	6
29.04.2014	2.5	ЮВ	12	ЮВ	6
29.03.2015	2	В	15-16	В	12
30.03.2015	2	ЮВ	11	ЮВ	6
08.12.2016	2.5	СЗ	13	СЗ	6
05.07.2017	2.5	СЗ	12	СЗ	6
17.10.2017	2.5	СЗ	11-12	СЗ	12
05.12.2017	2.5	ЮВ	12	ЮВ	6
26.12.2017	2.5	СЗ	12	СЗ	6

Продолжение таблицы В.5

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжительность, час
			скорость, м/с	направление, румб	
24.03.2018	2.5	ЮВ	12	ЮВ	6
11.05.2018	2.5	З	9	З	6
01.12.2018	2.5	ЮВ	10-11	ЮВ	18
11.12.2018	2.5	ЮВ	10	ЮВ	6
16.01.2019	2	ЮВ	10	ЮВ	12
17.01.2019	2	С	9	С	6
18.01.2019	2	СЗ	8	СЗ	6
18.02.2019	2	СЗ	10	СЗ	6
19.02.2019	2	СЗ	9	СЗ	18
21.02.2019	2	ЮВ	13	ЮВ	12
18.04.2019	2	СЗ	10	СЗ	12
03.05.2019	2.5	ЮВ	13	ЮВ	6
10.06.2019	2.5	В	2	В	6
11.06.2019	2.5	Ю	6	Ю	6
19.06.2019	2.5	В	4	В	6
26.07.2019	2	З	10	З	6
11.08.2019	2	СЗ	9	СЗ	6
21.09.2019	2	С	10	С	6
27.11.2019	2.5	ЮВ	12	ЮВ	6
24.12.2019	2.5	ЮВ	11	ЮВ	12
24.01.2020	2	З	10	З	6
19.02.2020	2.5	ЮВ	9	ЮВ	6
07.03.2020	2.5	ЮВ	12	ЮВ	6
06.04.2020	2	С	11	С	6
07.04.2020	2	С	9	С	12
15.04.2020	2	ЮВ	9	ЮВ	6
16.04.2020	2	СЗ	10	СЗ	6
17.04.2020	2	СЗ	9	СЗ	6
18.10.2020	2.5	ЮВ	10	ЮВ	6
21.10.2020	2.5	С	9	С	6
21.11.2020	2.5	ЮВ	12	ЮВ	12
13.12.2020	2.5	В	10	В	12
14.12.2020	2.5	ЮВ	11	ЮВ	6
15.12.2020	2.5	ЮВ	11	ЮВ	18
17.12.2020	2.5	ЮВ	10	ЮВ	6
28.01.2021	2.5	ЮВ	12	ЮВ	18
18.02.2021	2	СЗ	9	СЗ	6
22.02.2021	2	З	9	З	6
23.02.2021	2	СЗ	10	СЗ	6
24.02.2021	2	С	11	С	6
26.02.2021	2	З	10	З	6
16.03.2021	2	ЮВ	10	ЮВ	12
17.03.2021	2	ЮВ	9	ЮВ	18
23.03.2021	2	ЮВ	10	ЮВ	6
26.03.2021	2	З	10	З	6
02.04.2021	2	ЮВ	10	ЮВ	12
21.04.2021	2	ЮВ	10	ЮВ	12

Продолжение таблицы В.5

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжительность, час
			скорость, м/с	направление, румб	
23.04.2021	2	З	10	З	6
27.04.2021	2	СЗ	10	СЗ	6
10.05.2021	2	СЗ	10	З	12
26.05.2021	2	З	9	СЗ	12
05.06.2021	2	СВ	10	СВ	6
06.06.2021	2	С	12	С	6
03.09.2021	2	СЗ	10	СЗ	6
04.09.2021	2	СЗ	9	СЗ	6
22.10.2021	2	Ю	10	Ю	6
25.10.2021	2	СЗ	10	СЗ	6
28.10.2021	2	ЮВ	9	ЮВ	18
01.11.2021	2	ЮВ	10	ЮВ	6
10.11.2021	2	С	10	С	6
08.12.2021	2	ЮВ	11	ЮВ	12
09.12.2021	2	ЮВ	10	ЮВ	12
15.12.2021	2	ЮВ	11	ЮВ	6

Таблица В.6 - Сведения о волнении по данным МГ Курык

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжительность, час
			скорость, м/с	направление, румб	
30.09.2009	2	З	8	З	6
30.04.2014	2	Ю	7	Ю	6

Таблица В.7 - Сведения о волнении по данным МГ Фетисово

Дата	Высота волны, м	Направление волнения, румб	Ветер		Продолжительность, час
			скорость, м/с	направление, румб	
26.01.2007	2	ю			12
18.09.2007	2	з			6

Примечание: в Фетисово наблюдения за скоростью и направлением ветра начались в апреле 2010 г.

Таблица В.8 - Внутригодовое распределение значительной высоты волны по данным альтиметров

Год	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Среднее
1985			1.9	1.5	1.44	1.16	1.16	1.24	1.26	1.2	1.6	1.6	1.41
1986	1.78	1.37	1.09	1.3	1.31	1.37	1.17	1.04	1.25		1.85	1.68	1.38
1987	1.49	1.51	1.26	1.47	1.22	1.2	1.26	1.34	1.02	1.5	1.16	1.86	1.36
1988	1.46	1.71	1.45	1.21	1.88	1.41	1.67	1.67	1.37	1.29	1.45	1.61	1.52
1989	1.76	1.88	1.3	1.7	1.58	1.37	0.93	1.28	1.45	2.46			1.57
1990													
1991								0.99	0.75	0.43	0.52	1.18	0.77
1992	1.65	1.02	1.17					0.79	0.76	1.14	1.24		1.11
1993	0.99		0.82	0.74	0.54	0.52		0.54		0.79	0.74	1.62	0.81
1994	1.38	0.78	0.98	0.78									0.98
1995					0.73	0.82		0.52	0.79				0.72
1996													
1997													
1998													
1999													
2000													
2001													
2002	1.34		1.24	1.12	0.95	1.15	1.08	0.99	0.96	1.24	1.29	1.73	1.19
2003	1.2	1.33	1.25	1.42	0.88	1.06	1.06	0.92	1.1	1.09	1.17	1.3	1.15
2004	1.4	1.17	1.04	1.05	0.98	0.99	0.87	0.94					1.06
2005	1.48	1.49	1.38	0.99	1.13	1.37	1.15	0.98	1.51	1.46	1.18	1.26	1.28
2006	1.86	1.44	1.34	0.8	0.79	0.95	1.07	0.84	1.3	1.01	1.45	1.08	1.16
2007	1.14	1.16	1.09	0.87	0.92	0.87	0.84	0.9	1.03	1.06	1.24	1.45	1.05

Продолжение таблицы В.8

Год	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Среднее
2008	1.63	1.46	1.08	0.95	0.87	0.85	0.86	0.89	1.1	1.19	1.08	1.46	1.12
2009	1.9	1.36	1.18	0.93	0.77	0.84	0.94	0.92	1.02	1	1.43	1.21	1.13
2010	1.52	1.81	1.2	1.04	0.72	0.93	1.11	1.38	1.47	1.77	1.72	1.7	1.36
2011	1.78	2.12	1.8	1.62	1.49	1.57	1.56	1.64	1.58	1.87	1.96	1.95	1.75
2012	2.04	2.43	2.14	1.96	1.47	1.38	1.39	1.52	1.39	1.4	1.65	2	1.73
2013	2.14	1.72	1.79	1.25	1.23	1.27	1.44	1.4	1.57	1.74	1.72	1.88	1.60
2014	1.74	1.85	1.77	1.64	1.46	1.44	1.47	1.43	1.69	1.49	1.67	1.87	1.63
2015	1.89	1.81	1.65	1.46	1.33	1.49	1.46	1.47	1.48	1.67	1.73	1.73	1.60
2016	2.09	1.74	1.43	1.17	1.02	1.09	1.25	1.08	1.33	1.44	1.5	1.4	1.38
2017	1.55	1.58	1.35	1.31	1.23	1.19	1.29	1.27	1.45	1.49	1.31	1.67	1.39
2018	1.6	1.41	1.48	1.2	1.21	1.24	1.28	1.38	1.32	1.42	1.44	1.46	1.37
2019	1.57	1.49	1.42	1.22	1.14	1.22	1.31	1.23	1.34	1.01	1.17	1.14	1.27
2020	0.97	1.08	0.83	0.79	0.84	0.73	0.9	0.96	0.89	0.99	1.42	1.32	0.98
2021	1.32	1.24	1.17	0.9	0.88	0.82	0.88	0.85	0.98	1.14	1.22	1.18	1.05

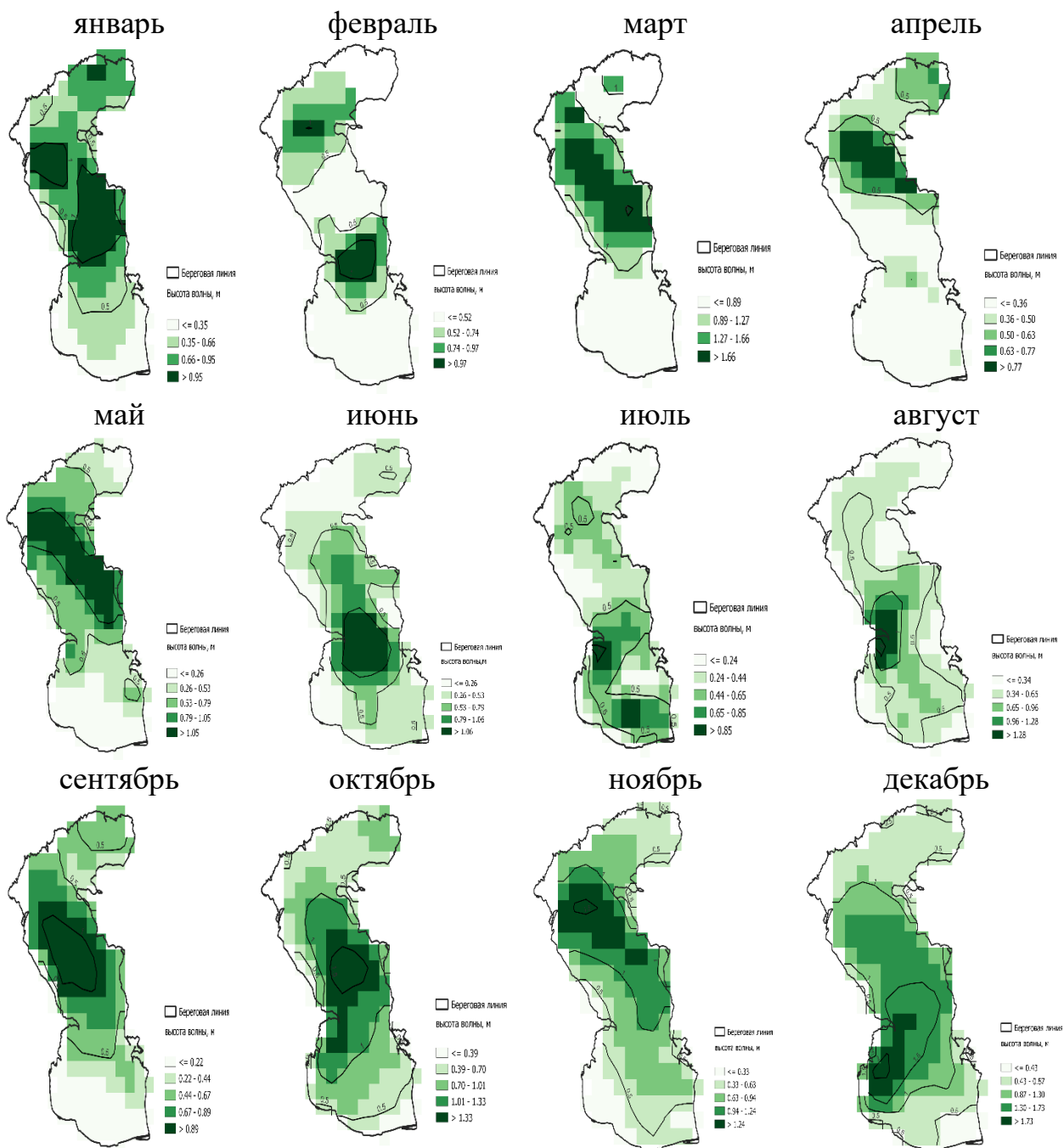


Рисунок В.1 – Распространение средней значительной высоты волны ветрового волнения на акватории Каспийского моря за 1959–2021 г. по данным модели ECWAM

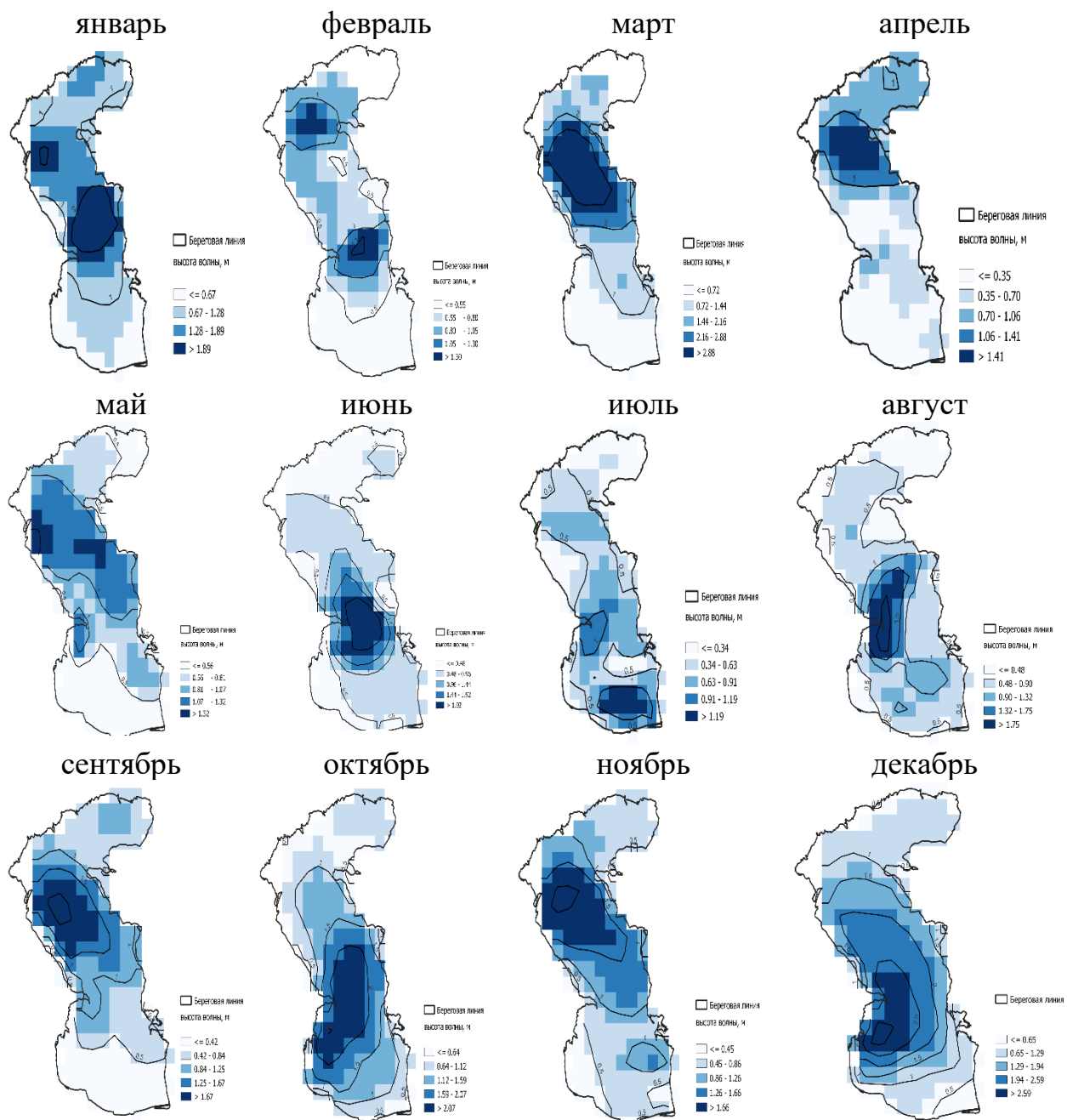


Рисунок В.2 – Распространение максимальной значительной высоты волны ветрового волнения на акватории Каспийского моря за 1959–2021 г. по данным модели ECWAM

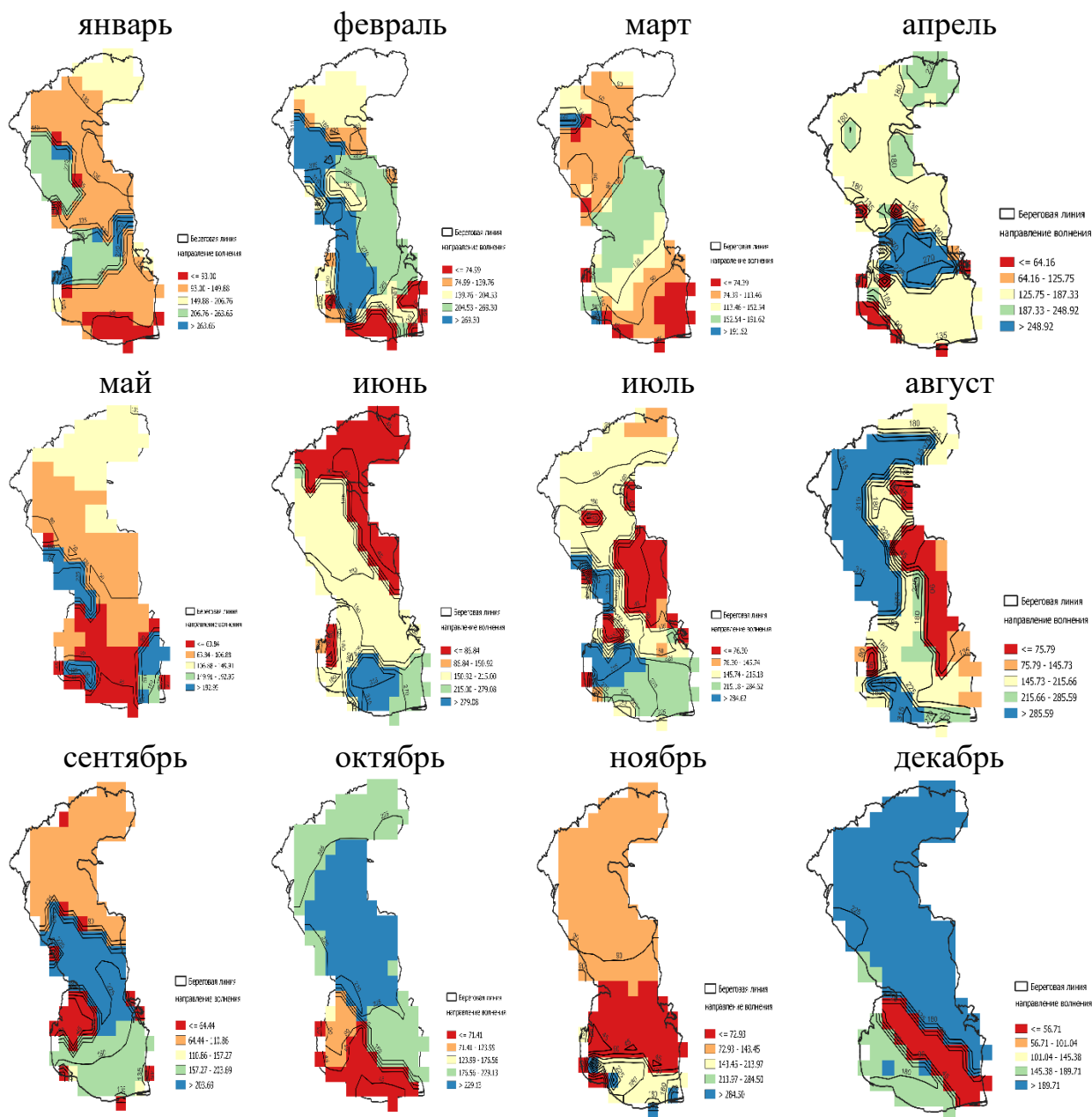


Рисунок В.3 – Распространение среднего направления ветрового волнения на акватории Каспийского моря за 1959–2021 г. по данным модели ЕСWAM

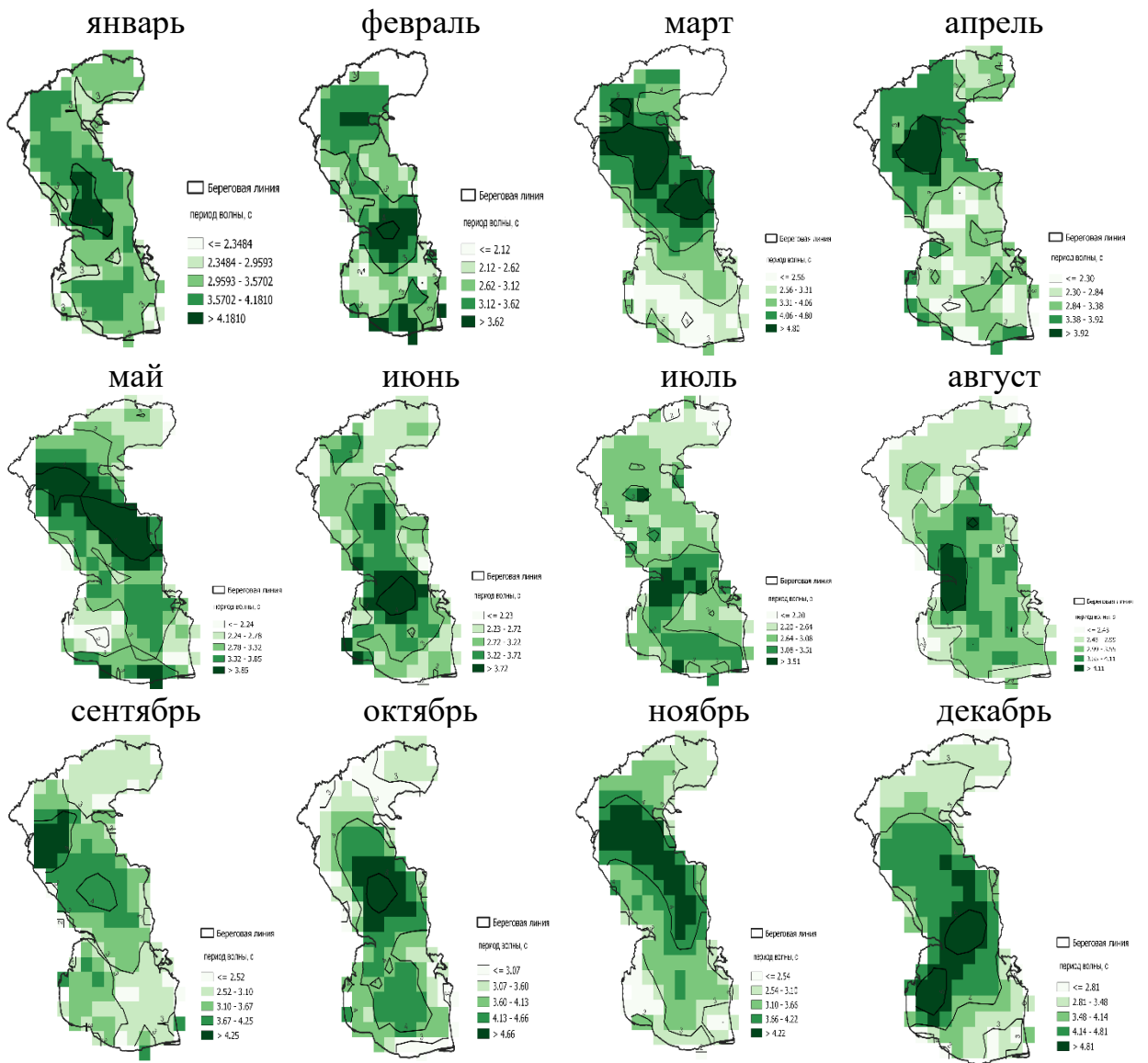


Рисунок В.4 – Распространение среднего периода ветрового волнения на акватории Каспийского моря за 1959–2021 гг. по данным модели ЕСWAM

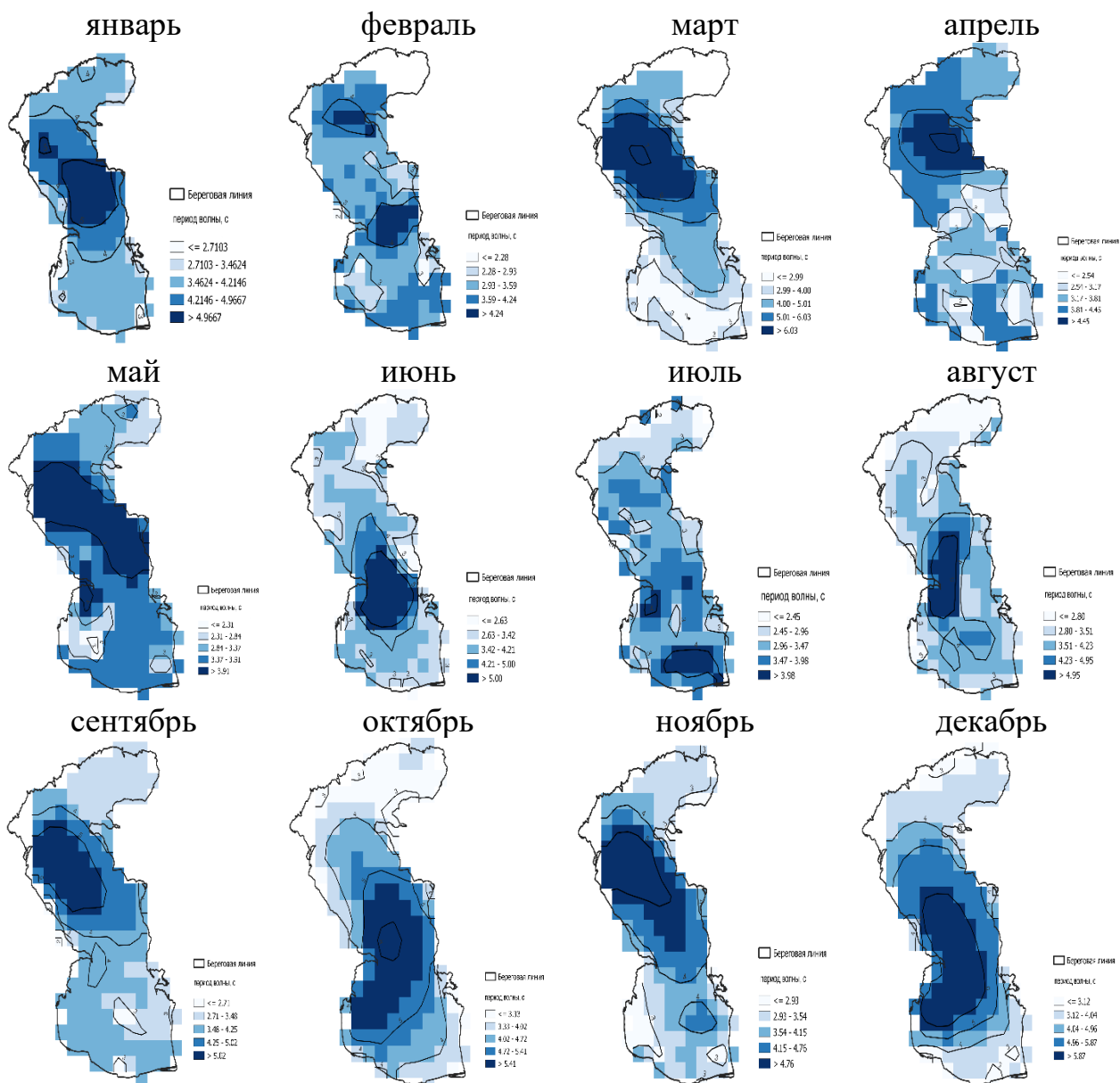


Рисунок В.5 – Распространение максимальных значений среднего периода ветрового волнения на акватории Каспийского моря за 1959–2021 гг. по данным модели ECWAM

Таблица В.9 - Расчетные команды модели SWAN

Команды	Описание команд
HSign	значительная высота волны (в м)
HSWEI	высота волны зыби (в м)
DIR	среднее направление распространения волны (в градусах)
PDIR	направление наибольшей (пиковой) волны (в градусах)
TDIR	направление переноса энергии (в градусах)
TM01	средний период абсолютной волны (в с)
RTM01	средний относительный период волны (в с)
RTP	наибольший (пиковый) период (в с) спектра плотности дисперсии (расхождения) (относительный частотный спектр)
TPS	'сглаженный' наибольший (пиковый) период (в с)
PER	средний период абсолютной волны (в с)
RPER	средний относительный период волны (в с)
TMM10	средний период абсолютной волны (в с)
RTMM10	средний относительный период волны (в с)
TM02	средний абсолютный период пересечения нуля (в с)
FSPR	нормализованная ширина спектра плотности
DSPR	направленное распространение волн (в градусах)
QP	островершинность спектра волны (безразмерный)
DEPTH	глубина воды (в м) (не нижний уровень!)
WATLev	уровень воды (в м). (Выход находится как в активных, так и в неактивных точках. Примечание: необходимо указать значение исключения для уровня воды! (См. Команду INPGRID WLEVEL EXCEPTION).)
BOTLev	уровень дна (в м). Выходной сигнал находится как в активных, так и в неактивных точках. Примечание: необходимо указать значение исключения для уровней дна! (См. Команду INPGRID BOTTOM EXCEPTION))
VEL	текущая скорость (вектор, в м/с)
FRCOEF	коэффициент трения (равный [cfw] или [kn] в команде FRICITION)
WIND	скорость ветра (вектор, в м/с)

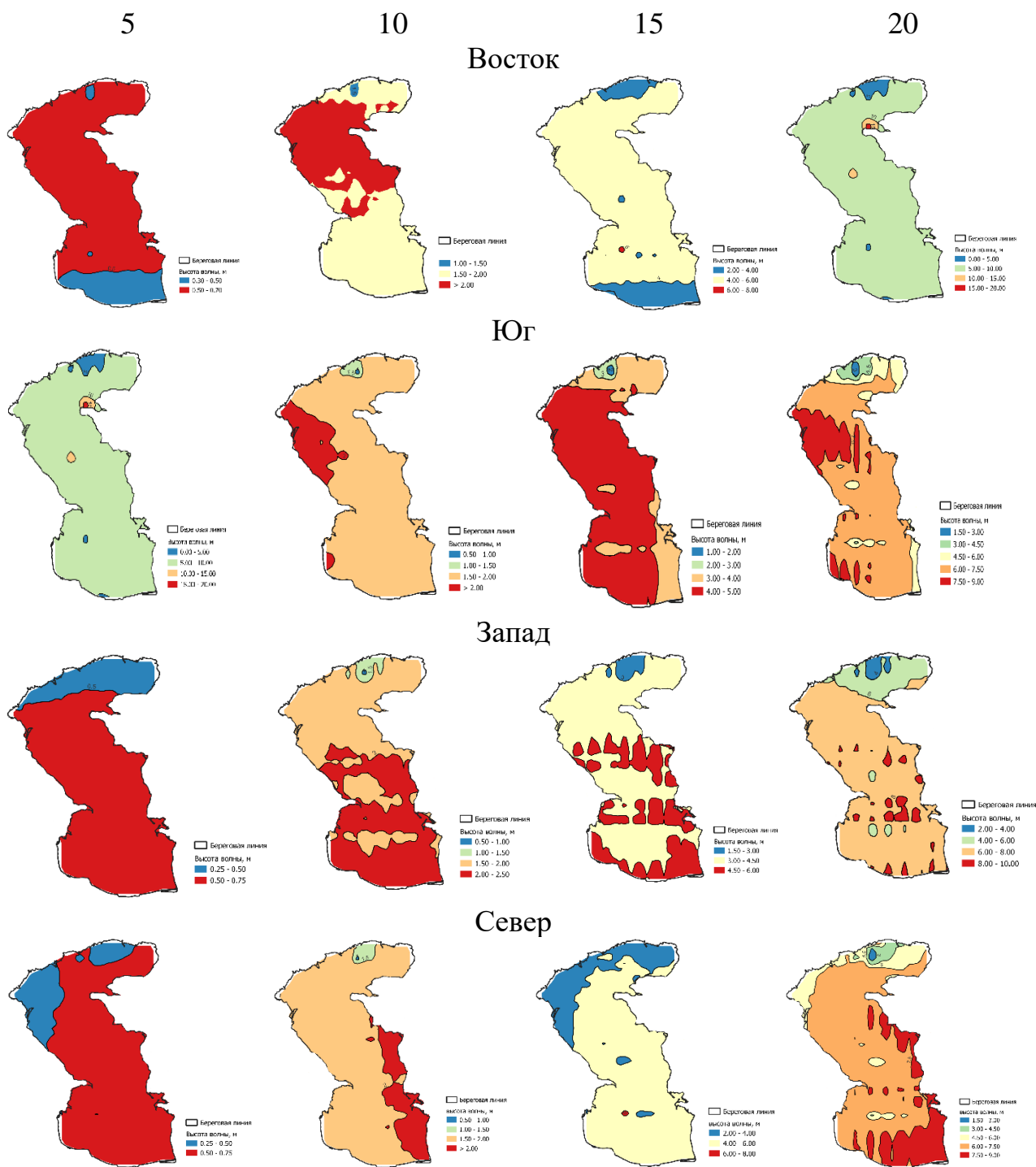


Рисунок В.6 - Карты зонирования казахстанской части Каспийского моря по высоте волны при стационарных характеристиках ветра

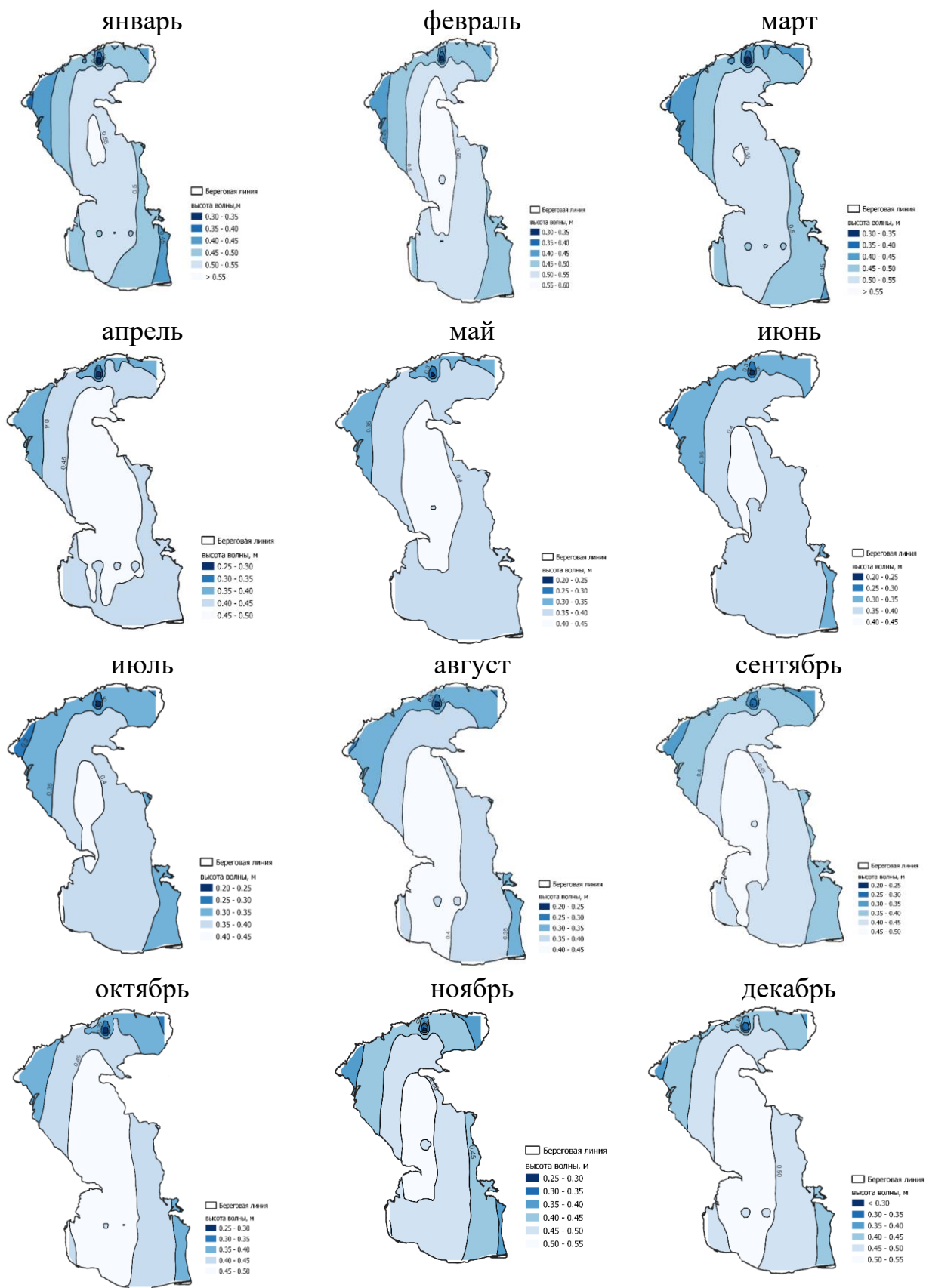


Рисунок В.7 – Карта распространения средней высоты волны за период 1959-2021 г.

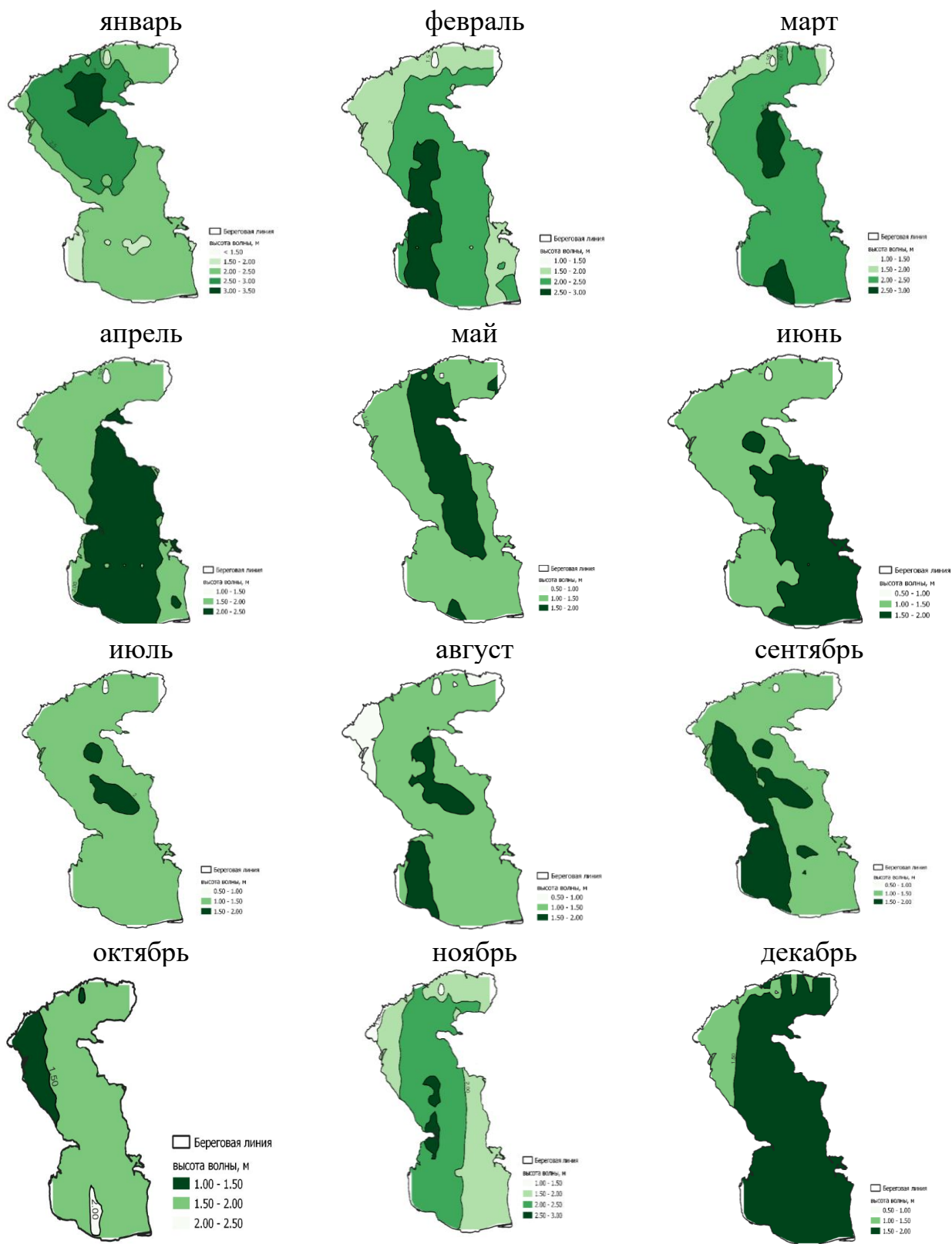


Рисунок В.8 – Карта распространения максимальной высоты волны за период 1959-2021 г.

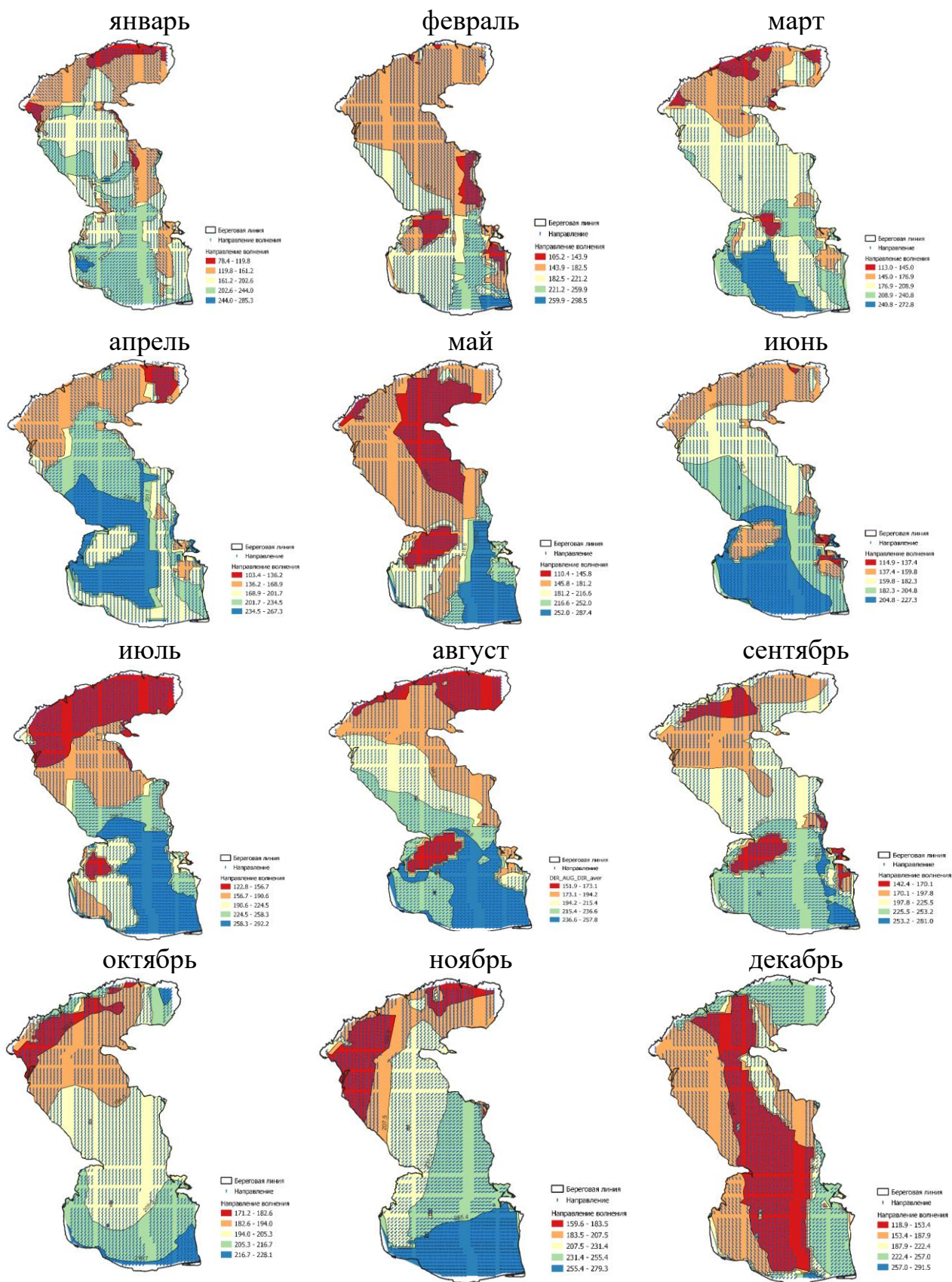


Рисунок В.9 – Карта распространения преобладающего направления волнения за период 1959-2021 г. по месяцам

Таблица В.10 - Количество случаев превышения высоты волны 2 м рассчитанных по модели SWAN

Год	Количество случаев	Кулалы	Форт-Шевченко	Актау	Курык
1959	45				
1960	79				
1961	999	3	3	4	
1963	222				
1964	18557	15	15	11	12
1965	113				
1968	1516				
1969	957				
1970	153				
1975	33				
1978	151				
1984	43				
1985					
1986	13				
1988	669				
1989	1963				
1990	784				
1993	11538	9	10	4	7
1994	469				
1995	27906	9	10	15	16
1997	302				
1998	71				
1999	5607				
2004	42				
2006	2672				
2007	89				
2008	2118				
2009	165				
2010	19284	10	13	8	11
2012	1521		1		
2014	1				
2015	6318			4	4
2017	5				
2019	11				

Таблица В.11 - Вычисление ординат эмпирической кривой обеспеченности средней высоты волнения по расчетным данным за период с 1959–2021 гг.

P, %	0,1	1	3	5	10	20	50	75	80	95	99	99,9
Кулалы, остров: $h_o = 0,47$ м, $C_v = 0,25$, $C_s = 5,18$												
Φ_p	9.04	4.52	2.6	1.8	0.8	0.08	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	2.19	1.09	0.63	0.44	0.19	0.02	-	-	-	-	-	-
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	3.19	2.09	1.63	1.44	1.19	1.02	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
$h_p = h_o \times k_p$	1.48	0.97	0.76	0.67	0.55	0.47	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
Форт-Шевченко: $h_o = 0,46$ м, $C_v = 0,24$, $C_s = 4,87$												
Φ_p	9.27	4.59	2.60	1.74	0.73	0.04	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	2.32	1.15	0.65	0.44	0.18	0.01	-	-	-	-	-	-
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	3.32	2.15	1.65	1.44	1.18	1.01	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
$h_p = h_o \times k_p$	1.56	1.01	0.78	0.67	0.56	0.47	0.43	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
Саура: $h_o = 0,46$ м, $C_v = 0,23$, $C_s = 5,18$												
Φ_p	9.27	4.59	2.60	1.74	0.73	0.04	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	2.13	1.06	0.60	0.40	0.17	0.01	-	-	-	-	-	-
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	3.13	2.06	1.60	1.40	1.17	1.01	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
$h_p = h_o \times k_p$	1.45	0.95	0.74	0.65	0.54	0.47	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
Актау: $h_o = 0,45$ м, $C_v = 0,21$, $C_s = 5,08$												
Φ_p	9.20	4.57	2.60	1.76	0.76	0.05	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	1.93	0.96	0.55	0.37	0.16	0.01	-	-	-	-	-	-
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	2.93	1.96	1.55	1.37	1.16	1.01	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
$h_p = h_o \times k_p$	1.32	0.88	0.70	0.62	0.52	0.45	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
Курыйк: $h_o = 0,46$ м, $C_v = 0,23$, $C_s = 5,29$												
Φ_p	9.27	4.59	2.60	1.74	0.73	0.04	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	2.13	1.06	0.60	0.40	0.17	0.01	-	-	-	-	-	-
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	3.13	2.06	1.60	1.40	1.17	1.01	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
$h_p = h_o \times k_p$	1.44	0.95	0.74	0.64	0.54	0.46	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42

Продолжение таблицы В.11

P, %	0,1	1	3	5	10	20	50	75	80	95	99	99,9
Песчаный: $h_o = 0,46$ м, $C_v = 0,21$, $C_s = 4,9$												
Φ_p	9.04	4.52	2.60	1.80	0.80	0.08	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	1.90	0.95	0.55	0.38	0.17	0.02	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	2.90	1.95	1.55	1.38	1.17	1.02	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
$h_p = h_o \times k_p$	1.33	0.90	0.71	0.63	0.54	0.47	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
Фетисово: $h_o = 0,42$ м, $C_v = 0,14$, $C_s = 4,7$												
Φ_p	8.89	4.49	2.61	1.83	0.85	0.11	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	1.24	0.63	0.37	0.26	0.12	0.02	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	2.24	1.63	1.37	1.26	1.12	1.02	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
$h_p = h_o \times k_p$	0.94	0.68	0.57	0.53	0.47	0.43	0.40	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39

Примечание: h_o – средняя высота волны за исследуемый период; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии, $k = h_i / h_o$ – модульный коэффициент, Φ_p – нормированные отклонения,

Таблица В.12 - Вычисление ординат эмпирической кривой обеспеченности максимальной высоты волнения по расчетным данным за период с 1959–2021 гг.

P, %	0,1	1	3	5	10	20	50	75	80	95	99	99,9
Кулалы, остров: $h_o = 1,68$ м, $C_v = 0,18$, $C_s = 1,92$												
Φ_p	5.77	3.55	2.49	1.99	1.31	0.63	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	1.04	0.64	0.45	0.36	0.24	0.11	0.05	0.13	0.14	0.18	0.19	0.19
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	2.04	1.64	1.45	1.36	1.24	1.11	0.95	0.87	0.86	0.82	0.81	0.81
$h_p = h_o \times k_p$	3.42	2.75	2.43	2.28	2.08	1.87	1.59	1.46	1.44	1.38	1.37	1.36
Форт-Шевченко: $h_o = 1,69$ м, $C_v = 0,18$, $C_s = 1,9$												
Φ_p	5.77	3.55	2.49	1.99	1.31	0.63	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	1.04	0.64	0.45	0.36	0.24	0.11	0.01	0.12	0.13	0.17	0.18	0.19
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	2.04	1.64	1.45	1.36	1.24	1.11	0.99	0.88	0.87	0.83	0.82	0.81
$h_p = h_o \times k_p$	3.45	2.77	2.45	2.30	2.09	1.88	1.67	1.50	1.47	1.41	1.38	1.37
Саура: $h_o = 1,71$ м, $C_v = 0,17$, $C_s = 1,66$												

Продолжение таблицы В.12

P, %	0,1	1	3	5	10	20	50	75	80	95	99	99,9
Φ_p	5.50	3.44	2.44	1.97	1.32	0.66	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	0.94	0.58	0.41	0.33	0.22	0.11	-	-	-	-	-	-
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	1.94	1.58	1.41	1.33	1.22	1.11	0.95	0.88	0.86	0.82	0.81	0.80
$h_p = h_0 \times k_p$	3.31	2.71	2.42	2.28	2.09	1.90	1.63	1.50	1.47	1.40	1.38	1.37
Актау: $h_0 = 1,7$ м, $C_v = 0,16$, $C_s = 1$												
Φ_p	4.53	3.02	2.25	1.88	1.34	0.76	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	0.72	0.48	0.36	0.30	0.21	0.12	-	-	-	-	-	-
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	1.72	1.48	1.36	1.30	1.21	1.12	0.97	0.88	0.86	0.79	0.75	0.71
$h_p = h_0 \times k_p$	2.93	2.52	2.31	2.21	2.06	1.91	1.66	1.50	1.47	1.34	1.27	1.21
Курък: $h_0 = 1,72$ м, $C_v = 0,16$, $C_s = 1,34$												
Φ_p	4.95	3.21	2.34	1.92	1.34	0.72	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	0.79	0.51	0.37	0.31	0.21	0.12	-	-	-	-	-	-
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	1.79	1.51	1.37	1.31	1.21	1.12	0.97	0.88	0.87	0.81	0.78	0.76
$h_p = h_0 \times k_p$	3.08	2.60	2.36	2.25	2.09	1.92	1.66	1.52	1.49	1.39	1.34	1.31
Песчаный: $h_0 = 1,70$ м, $C_v = 0,16$, $C_s = 1,0$												
Φ_p	4.53	3.02	2.25	1.88	1.34	0.76	-	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	0.72	0.48	0.36	0.30	0.21	0.12	-	-	-	-	-	-
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	1.72	1.48	1.36	1.30	1.21	1.12	0.97	0.88	0.86	0.79	0.75	0.71
$h_p = h_0 \times k_p$	2.93	2.52	2.31	2.21	2.06	1.91	1.66	1.50	1.47	1.34	1.27	1.21
Фетисово: $h_0 = 1,67$ м, $C_v = 0,15$, $C_s = -0,27$												
Φ_p	3.09	2.33	1.88	1.64	1.28	0.84	0.00	-	-	-	-	-
$\Phi_p C_v$	0.46	0.35	0.28	0.25	0.19	0.13	0.00	-	-	-	-	-
$k_p = \Phi_p C_v + 1$	1.46	1.35	1.28	1.25	1.19	1.13	1.00	0.90	0.87	0.75	0.65	0.54
$h_p = h_0 \times k_p$	2.44	2.25	2.14	2.08	1.99	1.88	1.67	1.50	1.46	1.26	1.09	0.90

Таблица В.13 - Корреляционная связь между фактическими и расчетными величинами высоты волны

пункт	Tai	NorESM2-MM	NorESM2-LM	NESM3	MRI-ESM2-0	MPI-ESM1-2-LR	MPI-ESM1-2-HR	MIROC6	MIROC-ES2L	KIOST-ESM	IPSL-CM6A-LR	INM-CM5-0	INM-CM4-8	GISS-E2-1-G	GFDL-ESM4	FGOALS-g3	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	CanESM5	CNRM-ESM2-1	CNRM-CM6-1	CMCC-ESM2	CMCC-CM2-SR5	CESM2	BCC-CSM2-MR	ACCESS-ESM1-5	ACCESS-CM2
Средние значения																											
Кулалы	-0.5	0.7	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	-0.8	0.7	0.7	-0.5	0.8	0.8	0.7	-0.7	-0.6	-0.7	-0.6	0.8	0.7	0.7	0.6	-0.8	-0.6	-0.6	0.7
	-0.4	-0.6	-0.7	-0.6	-0.7	-0.5	-0.6	-0.6	0.7	-0.6	-0.4	0.6	-0.6	0.7	0.8	-0.5	0.6	0.6	-0.5	-0.7	-0.6	0.7	-0.5	-0.7	-0.6	0.6	0.6
Форт-Шевченко	-0.5	0.6	-0.5	0.6	0.7	-0.7	0.7	0.7	-0.7	0.7	0.7	0.5	0.7	0.7	0.7	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	0.7	0.6	-0.7	0.7	-0.6	0.7	-0.6	-0.5
	-0.7	-0.6	-0.8	-0.6	-0.7	0.6	-0.6	-0.7	0.7	-0.7	-0.7	0.6	-0.7	0.7	0.5	-0.7	0.6	0.7	-0.5	-0.8	-0.6	0.6	-0.6	-0.6	-0.6	0.6	0.6
Актау	-0.6	0.8	-0.7	0.7	0.7	-0.6	-0.9	0.8	-0.6	0.7	-0.6	0.8	0.7	0.9	0.7	-0.8	-0.7	-0.6	-0.7	0.8	-0.7	0.6	-0.7	-0.8	-0.6	-0.8	-0.7
	-0.4	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	0.8	-0.6	-0.7	0.8	-0.8	-0.6	-0.6	-0.7	0.7	0.7	-0.5	0.7	0.7	-0.6	-0.7	-0.6	0.7	-0.6	0.6	-0.7	0.6	0.6
Максимальные значения																											
Кулалы	-0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	-0.7	-0.7	0.7	0.6	-0.7	0.6	-0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	-0.8	-0.6	-0.8	0.7	0.6	-0.8	0.9	-0.6	0.8	-0.6	0.7
	0.7	0.7	-0.6	-0.6	-0.6	0.6	0.7	-0.6	0.5	-0.7	-0.7	0.7	-0.7	0.7	0.6	-0.5	0.8	0.7	0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	0.8	-0.8
Форт-Шевченко	-0.6	0.6	0.6	0.7	-0.7	-0.5	-0.7	0.7	-0.8	-0.8	0.7	0.8	0.7	0.6	0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.9	0.7	0.7	0.7	-0.4	-0.7	0.7	-0.6	0.7
	0.7	0.5	-0.7	-0.6	-0.7	0.6	0.7	-0.6	0.5	-0.6	-0.7	0.6	-0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	0.6	0.7	-0.7
Актау	-0.7	0.7	-0.8	0.7	0.7	-0.7	-0.6	0.7	0.6	-0.6	0.8	-0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	-0.8	-0.7	-0.7	-0.6	0.6	0.4	0.7	0.6	0.8	-0.6	0.8
	-0.5	0.7	0.7	-0.6	0.8	-0.6	0.8	0.8	0.8	-0.7	-0.7	0.7	-0.7	0.5	0.7	-0.7	0.8	0.8	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	0.7	-0.6	0.7	-0.7

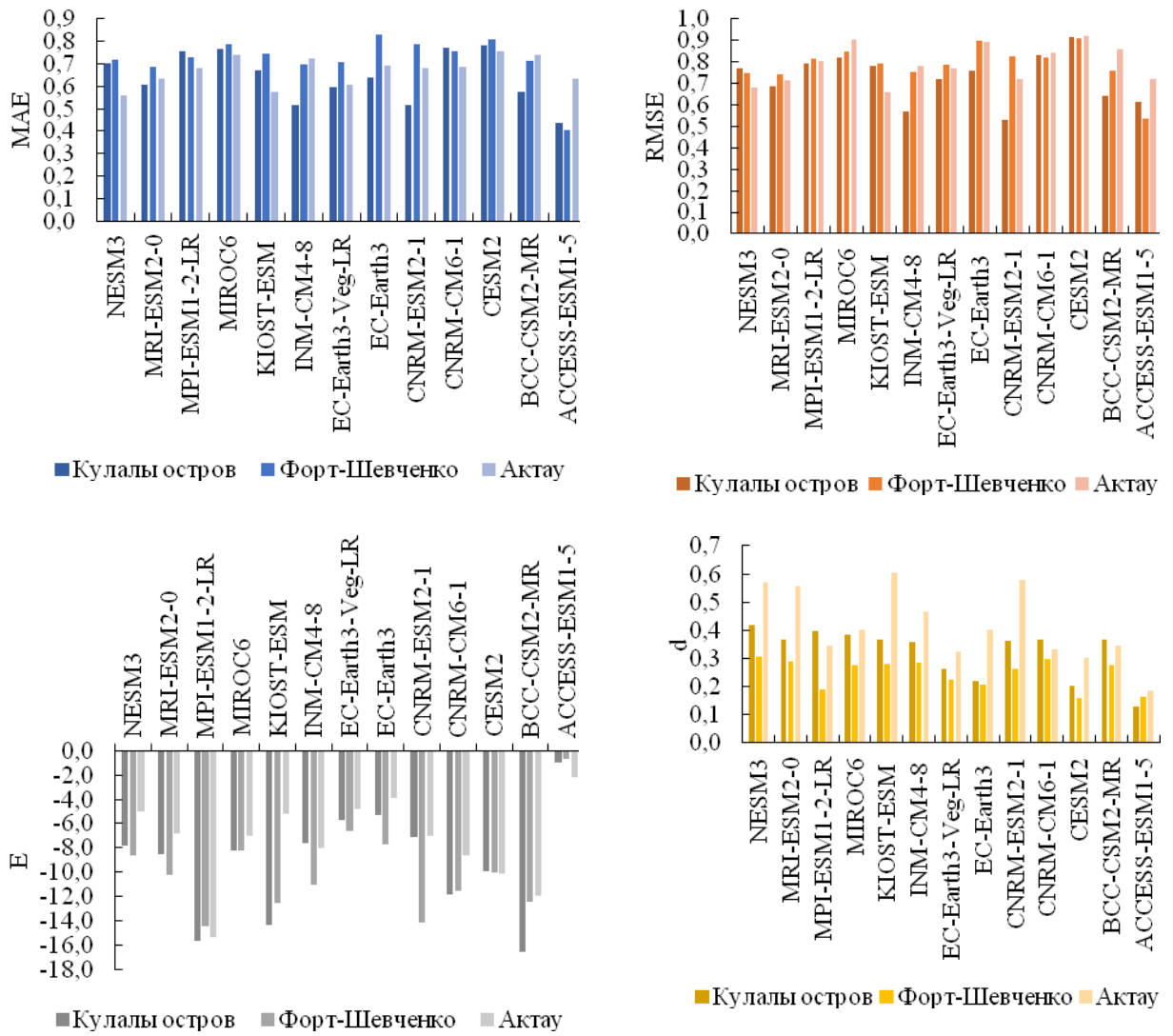


Рисунок В.10 - Гистограмма показателей абсолютной средней (MAE) и среднеквадратической ошибки (RMSE), коэффициента эффективности (E) и индекса согласия (d) для средней высоты волны по пунктам наблюдений

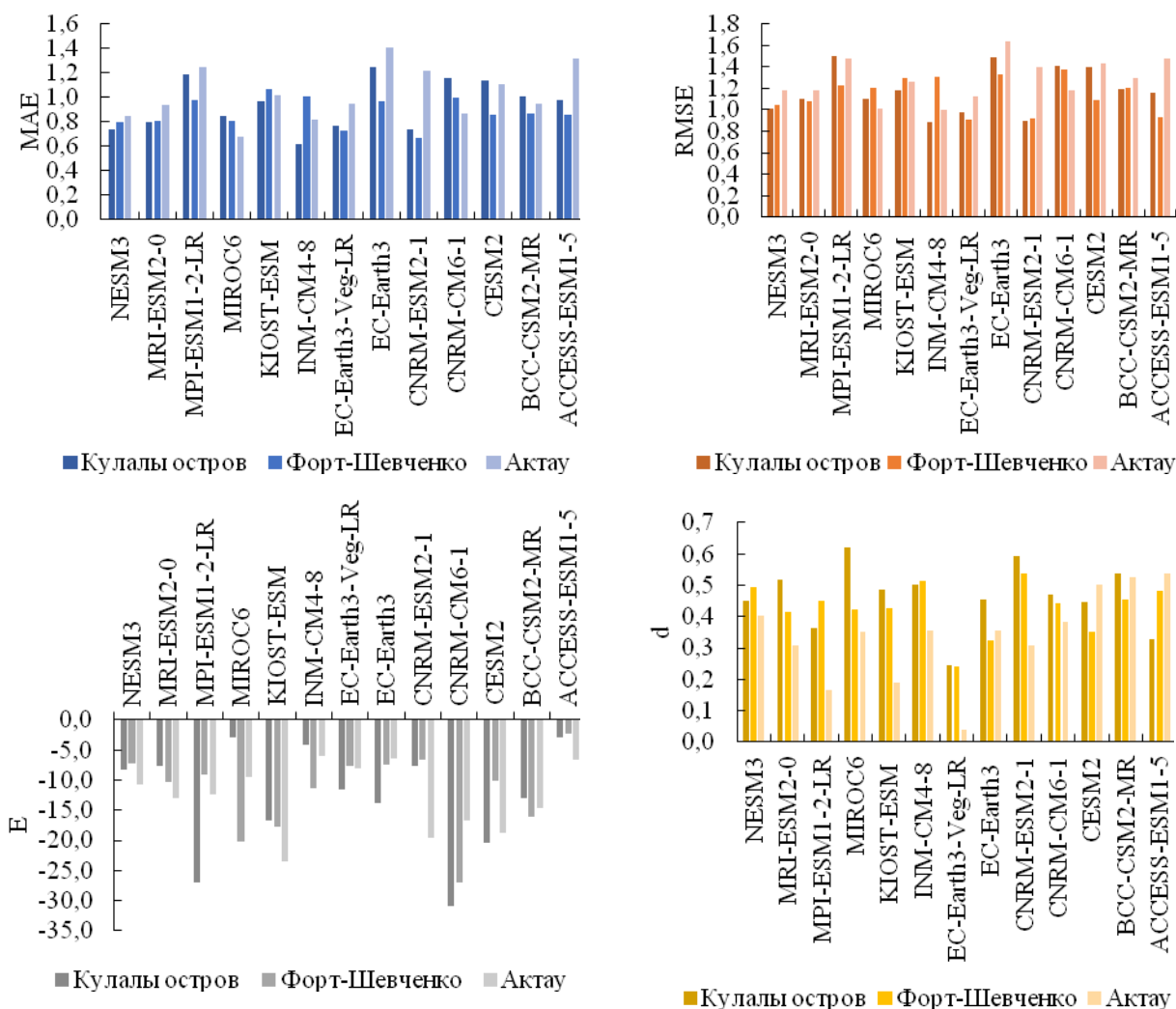


Рисунок В.11 - Гистограмма показателей абсолютной средней (MAE) и среднеквадратической ошибки (RMSE), коэффициента эффективности (E) и индекса согласия (d) для максимальной высоты волны по пунктам наблюдений

Таблица В.14 - Расчетная максимальная высота волны для пункта Кулалы остров по сценарию SSP1.26

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2015	2.7	2.1	2.2	1.7	2.2	1.7	2.6	2.3	2.3	2.9	2.1	1.9	2.8	2.9	1.7	2.3
2016	1.6	2.4	1.6	1.7	1.5	1.4	1.5	2.4	1.8	2.3	2.2	2.0	1.9	2.4	1.4	1.9
2017	1.6	2.6	1.9	1.3	1.5	3.0	1.8	2.3	2.2	2.2	1.8	1.7	2.2	3.0	1.3	2.0
2018	2.4	2.6	2.6	1.5	1.7	1.7	2.1	2.2	2.0	2.5	2.2	2.2	2.2	2.6	1.5	2.2
2019	2.8	2.2	1.6	1.9	1.4	1.5	1.7	2.4	2.0	2.4	2.6	2.0	1.6	2.8	1.4	2.0
2020	1.9	1.5	2.3	1.9	2.2	1.8	2.4	1.8	2.2	2.7	2.2	1.8	2.0	2.7	1.5	2.0
2021	1.7	1.8	1.4	1.5	1.2	2.0	1.6	2.0	2.1	2.2	2.0	2.1	2.1	2.2	1.2	1.8
2022	2.0	2.1	1.9	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	2.3	1.8	2.9	1.9	2.0	2.9	1.5	1.9
2023	1.8	1.7	2.4	3.7	2.2	2.6	2.4	1.6	2.1	1.8	2.4	2.4	2.3	3.7	1.6	2.3
2024	2.4	2.0	2.0	1.7	1.8	1.8	1.8	2.0	2.0	2.6	2.0	2.0	2.6	2.6	1.7	2.0
2025	2.7	2.1	2.0	1.5	2.1	2.6	1.8	1.9	2.1	1.8	1.8	2.0	1.8	2.7	1.5	2.0
2026	1.6	2.0	1.5	1.9	2.3	1.8	2.0	2.4	2.0	2.1	2.0	1.8	1.6	2.4	1.5	1.9
2027	2.4	2.1	1.9	2.0	1.7	2.0	1.8	1.8	1.7	2.1	2.2	2.4	1.9	2.4	1.7	2.0
2028	2.1	2.0	1.8	2.2	2.2	2.0	2.0	2.2	2.2	1.9	1.9	2.0	2.5	2.5	1.8	2.1
2029	2.7	2.0	2.6	2.4	1.7	2.5	2.1	2.2	2.2	2.0	2.7	1.9	3.9	3.9	1.7	2.4
2030	2.4	2.1	1.9	2.1	2.2	2.1	2.0	2.7	1.5	1.8	2.3	2.3	1.6	2.7	1.5	2.1
2031	2.1	2.6	1.8	1.6	1.9	1.8	2.2	2.0	2.1	1.9	1.6	1.9	1.7	2.6	1.6	2.0
2032	2.2	2.5	2.2	1.7	1.6	2.4	2.0	2.0	2.9	1.9	2.3	1.5	2.0	2.9	1.5	2.1
2033	2.3	2.1	2.0	1.8	2.9	1.5	2.8	2.2	1.8	2.1	1.7	1.9	2.3	2.9	1.5	2.1
2034	1.9	1.6	3.0	2.5	2.1	2.3	1.8	2.1	2.0	1.8	2.1	1.8	1.7	3.0	1.6	2.0
2035	2.1	2.2	1.8	1.5	1.7	2.2	1.9	2.0	1.9	2.0	2.2	2.4	1.8	2.4	1.5	2.0

Продолжение таблицы В.14

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2036	2.0	2.4	2.6	2.5	1.4	1.9	1.9	1.7	1.5	2.1	1.9	2.1	1.6	2.6	1.4	2.0
2037	1.8	1.9	2.0	1.8	2.5	1.6	1.8	1.9	1.8	2.5	1.8	2.1	1.9	2.5	1.6	2.0
2038	2.2	2.1	1.8	1.7	1.4	1.9	2.3	2.2	2.0	1.6	2.1	1.5	1.9	2.3	1.4	1.9
2039	1.9	2.6	2.1	2.5	2.9	1.7	2.2	2.3	2.1	2.4	2.2	1.9	2.0	2.9	1.7	2.2
2040	2.0	2.1	2.2	1.9	2.6	2.0	1.5	2.5	2.5	2.1	1.7	1.7	1.8	2.6	1.5	2.0
2041	2.0	1.8	2.7	1.9	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7	1.9	2.0	1.9	3.0	3.0	1.5	2.0
2042	2.3	1.8	3.0	2.5	2.0	1.8	1.7	2.0	2.1	1.9	1.7	2.0	2.1	3.0	1.7	2.1
2043	2.2	2.5	2.2	1.5	1.9	2.1	1.5	1.9	2.3	2.3	1.9	1.8	2.2	2.5	1.5	2.0
2044	2.3	2.0	1.9	1.8	1.9	1.9	2.5	1.8	3.1	2.9	2.8	1.9	1.5	3.1	1.5	2.2
2045	1.6	2.7	2.3	2.0	1.7	2.2	2.0	1.9	3.1	2.3	1.6	2.1	1.8	3.1	1.6	2.1
2046	2.0	2.1	1.8	1.5	2.4	1.3	1.7	1.9	3.1	2.1	2.0	1.7	1.7	3.1	1.3	1.9
2047	2.0	2.0	2.2	2.2	2.0	1.7	1.8	1.5	3.1	1.7	2.5	2.2	2.2	3.1	1.5	2.1
2048	1.9	2.2	2.0	2.3	1.3	1.7	1.7	2.0	2.1	2.2	2.1	2.1	1.8	2.3	1.3	2.0
2049	1.9	2.1	2.0	1.8	1.8	1.8	1.8	2.0	2.4	2.1	2.7	1.7	1.9	2.7	1.7	2.0
2050	2.3	2.6	2.3	2.1	1.8	2.0	2.7	2.0	2.1	2.0	2.0	2.4	2.4	2.7	1.8	2.2

Таблица В.15 - Расчетная максимальная высота волны для пункта Кулалы остров по сценарию SSP5.85

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2015	2.7	1.6	2.1	2.4	2.3	1.7	2.9	2.0	2.3	2.0	2.1	2.1	2.8	2.9	1.6	2.2
2016	1.6	2.0	2.2	1.7	1.6	2.1	2.6	2.0	2.7	2.0	2.2	1.5	1.8	2.7	1.5	2.0
2017	2.1	2.3	1.9	2.5	1.9	1.7	1.8	1.9	2.1	2.8	2.2	1.8	2.0	2.8	1.7	2.1
2018	2.2	2.6	2.2	1.8	1.8	2.2	1.6	2.1	2.6	2.1	2.2	2.2	2.5	2.6	1.6	2.2
2019	2.4	2.7	2.8	1.9	1.7	2.7	1.8	1.5	2.2	2.1	2.0	1.7	3.0	3.0	1.5	2.2
2020	1.9	1.7	2.1	1.6	1.9	2.2	1.8	2.0	2.6	1.7	2.7	2.4	1.7	2.7	1.6	2.0
2021	1.7	2.2	2.1	1.9	2.4	1.8	1.8	1.9	1.7	1.8	1.9	2.2	2.2	2.4	1.7	2.0
2022	2.0	2.2	2.2	2.5	1.6	1.5	2.2	2.7	2.3	1.8	2.4	1.7	1.6	2.7	1.5	2.1
2023	1.8	2.0	2.5	2.3	2.5	1.6	2.3	2.1	1.9	2.5	2.0	1.8	1.8	2.5	1.6	2.1
2024	1.8	2.4	2.0	1.5	1.5	1.9	1.6	1.8	2.4	2.1	2.1	2.1	2.0	2.4	1.5	1.9
2025	1.7	2.1	1.8	1.5	1.9	1.6	1.6	1.7	2.1	2.1	2.2	2.5	2.7	2.7	1.5	2.0
2026	1.7	2.0	2.6	2.1	2.0	1.6	2.1	2.4	2.0	1.6	2.2	2.6	1.6	2.6	1.6	2.0
2027	1.7	2.0	1.8	1.8	2.0	2.0	2.1	2.5	2.1	1.9	1.9	2.1	2.3	2.5	1.7	2.0
2028	1.6	2.2	2.4	1.8	1.9	1.5	1.7	2.2	1.9	1.9	2.5	2.3	2.0	2.5	1.5	2.0
2029	2.9	2.0	2.2	1.9	1.4	1.5	2.2	2.2	2.0	1.7	3.1	2.3	2.3	3.1	1.4	2.1
2030	2.0	2.4	2.1	1.5	1.4	2.1	2.0	2.5	2.5	1.9	2.0	2.0	1.8	2.5	1.4	2.0
2031	2.1	2.2	2.1	2.0	1.7	2.0	2.1	2.6	2.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.9	1.7	2.2
2032	2.5	2.0	2.1	1.8	1.6	1.6	2.6	1.5	2.1	1.8	1.9	1.9	2.7	2.7	1.5	2.0
2033	2.3	2.0	2.7	1.8	2.0	1.4	1.6	2.1	3.2	1.8	2.0	1.7	1.6	3.2	1.4	2.1
2034	1.8	2.0	2.0	1.6	1.6	1.4	2.1	2.0	2.0	1.7	2.9	1.8	2.1	2.9	1.4	1.9
2035	1.8	2.0	1.9	1.7	1.4	1.7	2.7	2.6	2.1	1.5	2.2	2.0	1.8	2.7	1.4	2.0

Продолжение таблицы В.15

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2036	2.3	2.5	2.2	1.4	1.8	2.2	2.0	2.1	2.0	2.1	1.7	2.7	2.0	2.7	1.4	2.1
2037	2.7	2.2	1.7	1.8	1.9	1.7	2.5	2.6	3.0	1.7	2.1	2.1	2.1	3.0	1.7	2.2
2038	2.8	2.2	2.4	1.5	2.5	1.8	2.6	2.0	2.1	2.6	2.0	2.8	2.0	2.8	1.5	2.3
2039	1.9	2.3	1.9	1.7	2.1	1.9	1.6	1.7	2.1	1.9	1.7	1.7	2.1	2.3	1.6	1.9
2040	1.7	2.0	2.1	2.0	1.9	1.7	2.0	1.8	2.0	2.0	2.6	2.2	1.7	2.6	1.7	2.0
2041	1.8	1.9	1.9	2.0	1.9	1.7	1.9	1.8	1.8	2.2	1.6	2.2	1.9	2.2	1.6	1.9
2042	2.1	2.2	2.2	1.6	1.5	1.3	1.8	2.1	1.8	2.7	1.9	1.9	2.1	2.7	1.3	2.0
2043	1.5	1.8	1.7	2.3	1.6	2.0	1.8	1.8	2.1	1.9	1.9	1.7	1.7	2.3	1.5	1.8
2044	2.2	2.1	2.1	1.7	1.7	1.8	2.3	2.5	2.2	2.2	1.7	2.7	2.6	2.7	1.7	2.2
2045	1.9	1.6	2.3	2.1	2.0	1.9	2.0	2.3	2.1	2.0	2.8	2.1	2.0	2.8	1.6	2.1
2046	2.0	2.4	2.3	1.9	1.9	2.0	1.6	1.9	2.1	3.1	2.5	2.3	1.5	3.1	1.5	2.1
2047	2.0	2.0	2.2	2.2	2.0	1.7	1.8	1.5	3.1	1.7	2.5	2.2	2.2	3.1	1.5	2.1
2048	1.9	2.2	2.0	2.3	1.3	1.7	1.7	2.0	2.1	2.2	2.1	2.1	1.8	2.3	1.3	2.0
2049	1.9	2.1	2.0	1.8	1.8	1.8	1.8	2.0	2.4	2.1	2.7	1.7	1.9	2.7	1.7	2.0
2050	2.3	2.6	2.3	2.1	1.8	2.0	2.7	2.0	2.1	2.0	2.0	2.4	2.4	2.7	1.8	2.2

Таблица В.16 - Расчетная максимальная высота волны для пункта Форт-Шевченко по сценарию SSP1.26

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2015	2.7	2.1	2.2	1.6	2.1	1.7	2.5	2.4	2.4	2.9	2.0	2.0	2.8	2.9	1.6	2.3
2016	1.7	2.4	1.6	1.8	1.5	1.5	1.6	2.5	1.8	2.4	2.2	1.9	1.9	2.5	1.5	1.9
2017	1.6	2.3	1.9	1.3	1.6	2.9	1.7	2.5	2.2	2.2	1.7	1.8	2.2	2.9	1.3	2.0
2018	2.4	2.6	2.6	1.6	1.6	1.7	2.1	2.4	2.0	2.5	1.7	2.1	2.2	2.6	1.6	2.1
2019	2.7	2.1	1.7	1.9	1.4	1.6	1.7	2.7	2.1	2.4	2.6	2.0	1.6	2.7	1.4	2.0
2020	2.1	1.5	2.2	1.7	2.3	1.7	2.4	1.7	2.2	2.6	2.2	1.8	1.9	2.6	1.5	2.0
2021	1.7	1.8	1.4	1.5	1.1	2.0	1.7	2.0	2.1	2.3	1.9	1.9	2.2	2.3	1.1	1.8
2022	1.9	2.1	2.0	1.8	1.4	1.5	1.5	1.5	2.3	1.7	2.8	1.9	2.0	2.8	1.4	1.9
2023	1.8	1.7	2.5	3.6	2.1	2.3	2.6	1.6	2.1	1.8	2.5	1.9	2.2	3.6	1.6	2.2
2024	2.6	2.1	1.9	1.8	1.9	1.9	1.8	2.0	1.9	2.6	2.0	1.9	2.5	2.6	1.8	2.1
2025	2.8	2.1	2.2	1.5	2.0	2.7	1.9	1.9	2.1	1.7	1.8	2.0	1.9	2.8	1.5	2.0
2026	1.7	2.0	1.5	1.9	2.3	1.9	2.0	2.5	2.0	2.1	2.0	1.8	1.6	2.5	1.5	1.9
2027	2.6	2.1	1.9	2.0	1.7	2.0	1.9	1.8	1.7	2.1	2.2	2.5	2.1	2.6	1.7	2.1
2028	2.0	2.0	1.8	2.2	2.2	2.1	2.0	2.2	2.1	1.8	1.9	1.9	2.5	2.5	1.8	2.1
2029	2.7	2.0	2.5	2.5	1.6	2.5	2.0	2.3	2.2	2.0	2.8	1.9	4.0	4.0	1.6	2.4
2030	2.4	2.1	1.9	2.1	2.2	2.1	1.9	2.6	1.5	1.8	2.3	2.2	1.6	2.6	1.5	2.1
2031	2.1	2.9	1.8	1.7	2.0	1.8	2.4	1.8	2.1	1.9	1.6	2.0	1.8	2.9	1.6	2.0
2032	2.2	2.5	2.2	1.7	1.6	2.6	2.0	2.0	2.9	2.1	2.3	1.5	2.0	2.9	1.5	2.1
2033	2.3	2.1	2.1	1.9	2.9	1.5	2.7	2.2	1.8	2.0	1.7	1.8	2.4	2.9	1.5	2.1
2034	1.9	1.6	2.9	2.5	2.3	2.2	2.0	2.1	2.0	1.8	2.1	1.8	1.7	2.9	1.6	2.1
2035	2.0	2.2	1.9	1.5	1.8	2.3	2.0	2.0	2.0	2.1	2.2	2.3	1.8	2.3	1.5	2.0

Продолжение таблицы В.16

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2036	2.0	2.5	2.5	2.6	1.4	1.9	1.9	1.7	1.6	2.1	2.0	2.0	1.7	2.6	1.4	2.0
2037	1.8	1.9	2.0	1.8	2.5	1.8	1.8	1.9	1.8	2.7	1.8	2.1	1.8	2.7	1.8	2.0
2038	2.3	2.1	1.9	1.7	1.4	1.8	2.2	2.2	2.0	1.7	2.1	1.5	2.0	2.3	1.4	1.9
2039	1.9	2.7	2.1	2.8	2.9	1.8	2.2	2.2	2.2	2.4	2.3	2.0	2.0	2.9	1.8	2.3
2040	2.0	2.2	2.3	1.9	2.6	2.0	1.5	2.5	2.5	2.2	1.7	1.7	1.9	2.6	1.5	2.1
2041	2.0	1.8	2.8	2.0	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7	2.1	2.1	2.0	3.0	3.0	1.5	2.0
2042	2.2	1.9	3.0	2.5	2.0	1.8	1.6	2.0	2.0	1.9	1.8	2.2	2.1	3.0	1.6	2.1
2043	2.2	2.5	2.2	1.5	1.8	2.0	1.6	1.9	2.3	2.2	1.9	1.8	2.2	2.5	1.5	2.0
2044	2.3	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	2.8	1.8	2.8	2.9	2.8	2.0	1.5	2.9	1.5	2.2
2045	1.6	2.6	2.3	2.0	1.6	2.1	2.0	1.8	2.7	2.4	1.7	2.1	1.8	2.7	1.6	2.1
2046	2.0	2.1	1.8	1.5	2.0	1.2	1.9	1.9	2.7	2.1	2.0	1.7	1.7	2.7	1.2	1.9
2047	1.9	2.0	2.3	2.1	2.1	1.7	1.9	1.5	2.7	1.7	2.4	2.2	2.2	2.7	1.5	2.1
2048	2.0	2.2	2.1	2.3	1.3	1.6	1.8	1.7	2.0	2.3	2.1	2.1	1.8	2.3	1.3	1.9
2049	1.9	2.2	2.0	1.8	1.7	1.7	1.7	1.9	2.4	2.2	2.6	1.7	1.9	2.6	1.7	2.0
2050	2.3	2.5	2.3	2.2	1.8	2.0	2.8	2.0	2.1	2.0	2.0	2.4	2.0	2.8	1.8	2.2

Таблица В.17 - Расчетная максимальная высота волны для пункта Форт-Шевченко по сценарию SSP5.85

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2015	2.7	1.6	2.1	2.4	2.2	1.9	2.8	2.0	2.3	1.9	2.1	2.3	2.8	2.8	1.6	2.3
2016	1.5	2.1	2.3	1.7	1.6	2.2	2.7	2.0	2.7	2.0	2.2	1.6	1.7	2.7	1.5	2.0
2017	2.1	2.3	1.8	2.4	1.9	1.8	1.9	1.9	2.2	2.8	2.2	1.8	2.0	2.8	1.8	2.1
2018	2.2	2.6	2.2	1.9	1.9	2.4	1.8	2.1	2.5	2.1	2.2	2.3	2.5	2.6	1.8	2.2
2019	2.4	2.6	2.8	1.9	1.7	2.7	1.8	1.5	2.1	2.1	2.0	1.6	3.0	3.0	1.5	2.2
2020	1.9	1.9	2.1	1.6	1.9	2.2	1.8	2.1	2.6	1.7	2.7	2.3	1.6	2.7	1.6	2.0
2021	1.8	2.2	2.2	1.9	2.4	1.8	1.8	2.0	1.7	1.8	2.1	2.1	2.3	2.4	1.7	2.0
2022	2.1	2.1	2.2	2.7	1.7	1.5	2.1	2.8	2.4	1.9	2.4	1.7	1.6	2.8	1.5	2.1
2023	1.7	2.1	2.7	2.3	2.4	1.6	2.3	2.1	1.9	2.6	2.0	1.8	1.7	2.7	1.6	2.1
2024	1.8	2.6	2.0	1.4	1.5	1.9	1.7	1.9	2.4	2.0	2.1	2.3	2.0	2.6	1.4	2.0
2025	1.7	2.1	2.0	1.5	2.0	1.6	1.6	1.6	2.0	2.0	2.2	2.5	2.7	2.7	1.5	2.0
2026	1.8	1.9	2.5	2.1	2.0	1.6	2.1	2.3	1.9	1.5	2.2	2.5	1.6	2.5	1.5	2.0
2027	1.8	2.0	1.8	1.7	2.0	2.1	2.2	2.7	2.2	1.8	1.9	2.3	2.2	2.7	1.7	2.1
2028	1.7	2.2	2.3	1.7	1.9	1.5	1.7	2.2	2.0	1.9	2.6	2.3	2.1	2.6	1.5	2.0
2029	2.8	2.1	2.2	1.9	1.4	1.4	2.1	2.3	2.0	1.8	3.3	2.3	2.3	3.3	1.4	2.1
2030	2.0	2.5	2.1	1.5	1.4	2.1	2.0	2.6	2.5	1.9	1.9	2.0	1.8	2.6	1.4	2.0
2031	2.1	2.2	2.2	1.9	1.6	2.0	2.1	2.4	2.9	2.0	2.1	2.1	2.1	2.9	1.6	2.1
2032	2.5	2.0	2.1	1.8	1.6	1.7	2.6	1.5	2.3	1.8	1.8	1.9	2.8	2.8	1.5	2.0
2033	2.3	2.1	2.7	1.8	1.9	1.4	1.6	2.0	3.3	1.8	2.0	1.7	1.5	3.3	1.4	2.0
2034	1.8	2.0	2.0	1.6	1.6	1.4	2.2	1.9	2.2	1.7	3.0	1.8	2.2	3.0	1.4	2.0
2035	1.8	2.0	1.9	1.7	1.4	1.8	2.8	2.7	2.2	1.6	2.3	2.0	1.7	2.8	1.4	2.0

Продолжение таблицы В.17

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2036	2.1	2.5	2.2	1.4	1.8	2.2	1.9	2.1	2.0	2.1	1.8	2.9	2.0	2.9	1.4	2.1
2037	2.7	2.6	1.7	1.7	1.9	1.7	2.5	2.6	3.0	1.7	2.1	2.2	2.1	3.0	1.7	2.2
2038	2.7	2.1	2.7	1.5	2.5	1.9	2.6	2.0	2.1	2.6	2.0	3.1	2.0	3.1	1.5	2.3
2039	1.9	2.3	1.9	1.7	2.1	1.9	1.7	1.7	2.1	1.8	1.7	1.7	2.1	2.3	1.7	1.9
2040	1.7	2.1	2.1	2.0	1.9	1.7	2.0	1.9	1.9	2.0	2.6	2.1	1.8	2.6	1.7	2.0
2041	1.8	1.8	2.0	2.0	2.0	1.7	2.0	1.9	1.8	2.1	1.6	2.2	1.9	2.2	1.6	1.9
2042	2.0	2.2	2.1	1.5	1.5	1.5	1.8	2.1	1.8	2.8	2.0	1.9	2.1	2.8	1.5	2.0
2043	1.5	1.8	1.7	2.3	1.6	2.0	1.8	1.9	2.1	1.9	1.9	1.8	1.7	2.3	1.5	1.8
2044	2.2	2.2	2.1	1.7	1.7	1.7	2.3	2.5	2.1	2.2	1.7	2.8	2.7	2.8	1.7	2.2
2045	2.1	1.5	2.3	2.2	1.9	2.0	2.0	2.3	2.1	2.1	3.1	2.1	2.0	3.1	1.5	2.1
2046	2.0	2.4	2.3	1.9	1.9	2.0	1.5	1.9	2.2	2.0	2.4	2.3	1.5	2.4	1.5	2.0
2047	2.1	2.2	2.0	2.2	1.6	1.9	2.2	2.2	2.0	1.7	1.8	1.8	2.8	2.8	1.6	2.0
2048	2.4	2.0	2.5	2.1	1.6	2.1	2.2	1.9	1.9	1.6	1.9	1.8	1.4	2.5	1.4	2.0
2049	1.9	2.3	1.6	1.8	1.5	2.1	2.2	1.7	1.9	2.2	1.8	1.7	1.6	2.3	1.5	1.9
2050	2.1	3.1	2.4	1.6	1.6	2.2	1.7	2.5	2.1	3.4	2.3	2.3	1.6	3.4	1.6	2.2

Таблица В.18 - Расчетная максимальная высота волны для пункта Актау по сценарию SSP5.85

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2015	2.9	2.3	2.2	1.6	2.2	1.8	2.3	3.0	2.0	2.9	2.4	2.0	2.6	3.0	1.6	2.3
2016	1.8	2.5	1.7	2.0	1.8	1.7	1.6	3.1	1.8	2.3	2.3	1.9	2.1	3.1	1.6	2.0
2017	1.7	2.3	2.2	1.3	1.7	3.0	1.6	3.1	2.3	2.3	1.9	1.9	2.2	3.1	1.3	2.1
2018	2.4	2.8	2.8	1.7	1.7	1.9	2.1	3.1	1.9	2.9	1.9	2.1	2.2	3.1	1.7	2.3
2019	2.1	1.8	2.2	2.0	1.5	1.6	1.7	3.1	2.3	2.5	2.8	2.2	1.7	3.1	1.5	2.1
2020	2.0	1.7	2.3	1.8	2.5	1.6	2.7	1.9	2.1	2.9	2.4	1.8	1.9	2.9	1.6	2.1
2021	1.7	2.0	1.5	1.5	1.5	2.1	1.6	2.0	2.1	2.7	2.0	1.9	2.0	2.7	1.5	1.9
2022	2.1	2.3	2.1	1.9	1.7	1.6	1.7	1.6	2.4	1.8	2.8	2.0	2.1	2.8	1.6	2.0
2023	1.7	1.7	2.9	3.6	2.2	2.7	2.3	1.9	2.2	2.0	3.3	1.9	2.3	3.6	1.7	2.4
2024	3.1	2.3	2.1	1.5	2.0	2.0	1.7	2.1	2.0	2.6	2.2	2.0	2.1	3.1	1.5	2.1
2025	3.1	2.1	2.0	1.6	1.9	2.7	2.3	2.0	2.2	1.7	2.0	2.0	1.9	3.1	1.6	2.1
2026	2.0	2.1	1.8	2.0	2.2	2.0	1.8	2.2	2.1	2.3	2.1	1.9	1.7	2.3	1.7	2.0
2027	3.1	2.6	2.0	2.0	1.4	2.3	2.0	2.1	1.8	2.1	2.3	2.6	2.4	3.1	1.4	2.2
2028	2.1	2.0	1.7	2.2	2.0	2.0	2.0	2.5	2.1	2.0	1.9	1.9	2.5	2.5	1.7	2.1
2029	2.6	2.3	2.5	2.4	1.9	2.3	2.2	2.1	2.3	2.1	2.5	2.0	3.6	3.6	1.9	2.4
2030	2.4	2.3	2.1	2.0	2.0	2.2	2.0	2.9	1.6	1.8	2.0	2.3	1.7	2.9	1.6	2.1
2031	2.3	3.3	2.0	2.0	2.0	1.7	2.8	1.9	2.0	1.9	1.7	2.1	2.0	3.3	1.7	2.1
2032	2.4	2.2	2.3	1.6	1.7	2.5	2.3	1.9	2.6	2.1	2.4	1.5	1.8	2.6	1.5	2.1
2033	2.5	2.2	2.1	2.0	2.7	1.8	2.9	2.3	1.9	2.1	1.7	1.7	2.2	2.9	1.7	2.2
2034	2.0	1.8	2.7	2.3	2.5	2.4	2.1	2.0	2.1	2.1	2.2	1.8	1.8	2.7	1.8	2.1
2035	2.0	2.5	1.9	1.8	2.0	2.3	2.1	2.2	2.1	2.2	2.2	2.4	1.8	2.5	1.8	2.1

Продолжение таблицы В.18

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2036	2.1	2.6	2.2	2.3	1.5	2.2	1.9	1.7	1.7	1.9	2.0	2.2	1.7	2.6	1.5	2.0
2037	2.0	2.2	1.9	2.0	2.6	2.2	1.7	2.1	2.0	2.7	2.1	2.1	2.0	2.7	1.7	2.1
2038	2.4	2.1	2.1	2.0	1.5	2.2	2.2	2.4	2.0	1.9	2.3	1.6	2.1	2.4	1.5	2.1
2039	2.2	2.9	2.2	3.0	3.3	2.2	2.1	2.2	2.3	2.6	2.3	1.8	1.7	3.3	1.7	2.4
2040	2.1	2.1	2.1	2.0	2.8	1.8	1.7	2.3	2.6	2.1	1.7	1.8	2.1	2.8	1.7	2.1
2041	2.1	2.0	2.9	2.0	1.5	1.6	1.8	2.0	1.9	2.0	2.1	1.9	2.9	2.9	1.5	2.1
2042	2.3	2.1	3.6	2.3	2.1	2.0	1.8	2.0	2.1	2.2	1.8	2.3	2.3	3.6	1.8	2.2
2043	2.4	2.2	2.2	1.5	1.7	2.0	1.7	2.1	2.2	2.3	2.0	1.7	2.1	2.4	1.5	2.0
2044	2.5	2.0	2.1	2.0	2.2	1.8	2.8	1.8	2.2	2.9	2.8	2.5	1.6	2.9	1.6	2.3
2045	1.9	2.5	2.3	1.9	1.6	2.2	2.3	1.8	2.3	2.4	1.9	2.0	1.7	2.5	1.6	2.1
2046	2.0	2.3	1.7	1.6	1.7	1.3	2.3	2.2	2.4	2.2	2.0	1.8	1.9	2.4	1.3	2.0
2047	2.0	2.1	2.4	2.1	2.0	1.7	2.3	1.4	2.2	1.9	2.4	2.2	2.1	2.4	1.4	2.1
2048	2.0	2.4	2.0	2.2	1.3	1.6	1.9	1.6	2.2	2.4	2.3	1.9	1.8	2.4	1.3	2.0
2049	2.0	2.5	2.1	1.8	1.6	1.8	1.6	2.0	2.3	2.2	2.7	1.9	2.0	2.7	1.6	2.0
2050	2.5	2.4	2.3	2.1	1.9	1.7	2.4	2.2	1.9	2.0	2.0	2.7	2.0	2.7	1.7	2.2

Таблица В.19 - Расчетная максимальная высота волны для Актау по сценарию SSP5.85

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2015	2.9	1.8	2.0	2.3	2.1	1.9	2.8	2.1	2.2	2.0	2.2	2.8	2.6	2.9	1.8	2.3
2016	1.5	2.2	2.0	1.7	1.7	2.3	2.7	2.1	2.7	2.1	2.5	1.7	1.7	2.7	1.5	2.1
2017	1.7	2.5	1.9	2.1	2.0	1.6	1.9	2.0	2.1	2.8	2.4	1.8	2.2	2.8	1.6	2.1
2018	2.2	2.5	2.4	2.3	2.0	2.5	1.7	2.2	2.6	1.9	2.4	2.3	2.7	2.7	1.7	2.3
2019	2.3	2.9	3.0	1.9	1.9	2.3	2.0	1.6	2.3	2.0	2.2	1.7	3.1	3.1	1.6	2.2
2020	1.9	1.8	2.1	1.5	2.0	2.4	2.0	2.2	2.6	1.7	2.9	2.1	1.7	2.9	1.5	2.1
2021	2.0	2.3	2.3	1.7	2.1	2.1	2.1	2.0	1.9	1.9	2.2	2.3	2.2	2.3	1.7	2.1
2022	2.2	2.2	2.1	2.4	1.7	1.6	2.1	2.8	2.3	2.0	2.5	1.7	1.8	2.8	1.6	2.1
2023	2.0	2.1	2.5	2.2	2.0	1.8	2.5	2.2	2.1	2.9	2.1	2.0	1.8	2.9	1.8	2.1
2024	2.2	2.4	2.1	1.4	1.6	2.1	1.8	2.2	2.5	1.9	2.0	2.5	2.1	2.5	1.4	2.1
2025	1.8	2.1	2.0	1.6	2.1	1.8	1.9	1.6	2.3	2.0	2.6	2.5	2.8	2.8	1.6	2.1
2026	2.0	2.2	2.3	2.2	1.9	1.6	2.1	2.4	2.1	1.6	2.5	2.5	1.6	2.5	1.6	2.1
2027	1.6	2.1	1.9	1.9	2.4	2.1	2.4	2.7	2.2	1.7	2.1	2.5	2.1	2.7	1.6	2.1
2028	1.8	2.1	2.5	1.8	1.7	1.7	2.1	2.2	1.8	2.1	2.9	2.4	2.2	2.9	1.7	2.1
2029	2.9	2.4	2.5	2.0	1.4	1.5	2.3	2.6	2.3	2.1	4.1	2.3	2.0	4.1	1.4	2.3
2030	2.1	2.6	2.5	1.5	1.5	2.0	2.0	3.0	2.3	2.1	2.0	2.1	1.9	3.0	1.5	2.1
2031	2.1	2.3	2.5	1.9	1.6	2.0	2.1	2.4	2.9	2.1	2.1	2.2	2.2	2.9	1.6	2.2
2032	2.7	2.1	2.0	2.0	1.7	1.8	2.5	1.5	3.2	1.6	1.9	2.0	2.9	3.2	1.5	2.1
2033	2.4	2.2	2.2	1.9	2.0	1.5	1.7	2.1	3.0	1.9	2.1	1.9	1.7	3.0	1.5	2.0
2034	2.0	2.0	2.2	1.8	1.8	1.6	2.3	2.1	3.0	1.8	3.0	2.1	2.0	3.0	1.6	2.1
2035	1.8	1.8	1.9	1.9	1.5	2.0	2.8	2.7	3.0	1.8	2.5	2.0	1.8	3.0	1.5	2.1

Продолжение таблицы В.19

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2036	2.3	2.6	2.5	1.5	1.8	2.3	2.0	2.1	1.9	2.3	2.0	3.0	2.0	3.0	1.5	2.2
2037	2.2	2.9	1.7	1.8	1.9	2.0	2.5	2.8	3.0	1.6	2.5	2.3	2.5	3.0	1.6	2.3
2038	2.8	2.0	2.6	1.8	2.5	1.9	2.5	2.1	2.1	2.6	1.8	3.2	1.9	3.2	1.8	2.3
2039	2.2	2.4	2.1	1.7	2.1	1.9	1.8	1.7	2.4	1.8	1.8	1.6	2.2	2.4	1.6	2.0
2040	1.7	2.2	2.2	2.4	1.9	1.9	2.3	2.3	2.0	2.3	2.4	2.1	1.9	2.4	1.7	2.1
2041	1.8	1.9	2.1	2.0	1.6	1.8	2.3	2.3	2.0	2.0	1.6	2.3	2.1	2.3	1.6	2.0
2042	2.1	2.3	2.1	1.5	1.6	1.8	1.9	2.3	1.9	2.9	2.2	2.1	2.0	2.9	1.5	2.1
2043	1.7	1.9	1.8	2.5	1.9	1.8	1.9	2.3	2.2	2.0	2.3	2.0	1.6	2.5	1.6	2.0
2044	2.1	2.3	2.2	2.0	1.9	1.9	2.2	2.6	1.9	2.2	1.8	2.4	2.8	2.8	1.8	2.2
2045	2.1	1.7	2.7	2.6	1.7	2.3	2.1	2.3	2.3	2.1	3.6	2.0	1.7	3.6	1.7	2.3
2046	2.2	2.4	2.4	2.0	1.9	2.0	1.6	2.1	1.9	2.1	2.5	2.1	1.5	2.5	1.5	2.1
2047	2.1	2.3	1.8	2.2	1.8	1.9	2.3	2.5	2.1	1.8	1.9	1.7	2.5	2.5	1.7	2.1
2048	2.5	2.2	2.8	2.1	1.7	2.3	2.3	1.8	2.0	1.6	2.0	1.7	1.5	2.8	1.5	2.1
2049	1.9	2.4	1.7	1.7	1.5	2.0	2.2	1.7	1.8	2.1	2.0	1.7	1.7	2.4	1.5	1.9
2050	2.2	3.2	2.0	1.7	1.5	2.3	1.9	2.7	2.2	3.5	2.2	2.6	1.6	3.5	1.5	2.3

Таблица В.20 - Расчетная максимальная высота волны у Курыка по сценарию SSP5.85

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2015	2.9	2.3	2.3	1.6	2.2	1.8	2.6	2.9	2.3	3.0	2.4	2.0	2.8	3.0	1.6	2.4
2016	1.8	2.5	1.7	2.0	1.7	1.6	1.6	3.0	1.9	2.4	2.3	1.9	2.1	3.0	1.6	2.0
2017	1.7	2.3	2.1	1.3	1.7	3.0	1.7	2.9	2.3	2.4	1.8	1.9	2.2	3.0	1.3	2.1
2018	2.4	2.8	2.8	1.7	1.7	1.9	2.2	2.9	2.0	2.7	1.9	2.2	2.3	2.9	1.7	2.3
2019	2.5	1.9	2.1	2.0	1.5	1.6	1.7	2.9	2.2	2.5	2.7	2.2	1.7	2.9	1.5	2.1
2020	2.0	1.7	2.3	1.7	2.5	1.7	2.6	1.9	2.2	2.9	2.4	1.8	2.0	2.9	1.7	2.1
2021	1.7	2.0	1.4	1.6	1.4	2.1	1.7	2.1	2.1	2.6	2.1	1.9	2.1	2.6	1.4	1.9
2022	2.0	2.3	2.1	1.9	1.6	1.6	1.7	1.7	2.4	1.9	2.8	2.0	2.1	2.8	1.6	2.0
2023	1.8	1.7	2.9	3.7	2.2	2.7	2.5	1.8	2.3	2.0	3.1	1.9	2.4	3.7	1.7	2.4
2024	3.1	2.3	2.0	1.7	2.0	2.0	1.8	2.1	2.0	2.6	2.2	2.0	2.4	3.1	1.7	2.2
2025	3.1	2.2	2.0	1.6	2.0	2.8	2.2	2.0	2.2	1.7	2.0	2.0	1.9	3.1	1.6	2.1
2026	2.0	2.0	1.7	1.9	2.3	2.0	1.9	2.3	2.1	2.3	2.1	1.9	1.7	2.3	1.7	2.0
2027	3.1	2.5	2.0	2.1	1.6	2.2	2.0	2.1	1.8	2.1	2.2	2.7	2.4	3.1	1.6	2.2
2028	2.1	2.0	1.7	2.4	2.1	2.1	2.0	2.5	2.2	2.0	2.0	2.0	2.6	2.6	1.7	2.1
2029	2.7	2.2	2.6	2.6	1.9	2.5	2.2	2.2	2.4	2.0	2.7	2.0	3.9	3.9	1.9	2.5
2030	2.5	2.3	2.1	2.0	2.1	2.1	2.0	2.9	1.6	1.8	2.2	2.4	1.7	2.9	1.6	2.1
2031	2.3	3.2	2.0	1.9	2.1	1.7	2.7	2.0	2.1	2.0	1.8	2.1	2.0	3.2	1.7	2.1
2032	2.4	2.4	2.3	1.6	1.7	2.7	2.3	2.0	2.8	2.1	2.4	1.6	1.9	2.8	1.6	2.2
2033	2.5	2.3	2.2	2.0	3.0	1.8	2.9	2.4	1.9	2.1	1.8	1.8	2.4	3.0	1.8	2.2
2034	2.0	1.8	2.9	2.2	2.6	2.4	2.2	2.1	2.1	2.1	2.2	1.8	1.8	2.9	1.8	2.2
2035	2.0	2.5	2.0	1.8	2.0	2.3	2.2	2.2	2.1	2.2	2.2	2.5	1.8	2.5	1.8	2.1

Продолжение таблицы В.20

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2036	2.1	2.6	2.3	2.4	1.5	2.1	1.9	1.8	1.7	2.1	2.0	2.2	1.8	2.6	1.5	2.0
2037	1.9	2.1	2.1	1.9	2.5	2.1	1.7	2.1	2.0	2.8	2.0	2.1	1.9	2.8	1.7	2.1
2038	2.4	2.2	2.1	1.9	1.5	2.1	2.2	2.4	2.0	1.8	2.2	1.5	2.1	2.4	1.5	2.0
2039	2.1	2.9	2.2	3.0	3.3	2.1	2.3	2.2	2.5	2.5	2.3	2.0	1.9	3.3	1.9	2.4
2040	2.1	2.0	2.3	2.0	2.9	2.0	1.7	2.5	2.6	2.2	1.7	1.9	2.1	2.9	1.7	2.2
2041	2.1	1.9	2.9	2.1	1.6	1.6	1.8	1.9	1.9	2.2	2.2	1.9	3.0	3.0	1.6	2.1
2042	2.3	2.1	3.6	2.6	2.0	1.9	1.8	2.0	2.2	2.2	1.8	2.4	2.2	3.6	1.8	2.2
2043	2.4	2.4	2.2	1.6	1.8	2.0	1.7	2.1	2.4	2.3	2.0	1.8	2.2	2.4	1.6	2.1
2044	2.5	2.0	2.1	2.0	2.2	1.9	2.8	1.8	2.2	2.9	2.9	2.4	1.6	2.9	1.6	2.3
2045	1.9	2.6	2.4	1.9	1.6	2.1	2.3	1.8	2.2	2.4	1.9	2.1	1.8	2.6	1.6	2.1
2046	2.1	2.3	1.8	1.6	1.8	1.3	2.3	2.2	2.3	2.2	2.1	1.8	1.9	2.3	1.3	2.0
2047	2.0	2.1	2.4	2.2	2.1	1.7	2.3	1.5	2.3	1.9	2.5	2.3	2.2	2.5	1.5	2.1
2048	2.0	2.4	2.1	2.3	1.4	1.6	1.9	1.6	2.2	2.4	2.3	2.0	1.9	2.4	1.4	2.0
2049	2.1	2.5	2.1	1.9	1.7	1.8	1.7	2.0	2.4	2.1	2.7	1.9	2.0	2.7	1.7	2.1
2050	2.3	2.6	2.3	2.1	1.9	1.9	2.5	2.2	2.0	2.1	2.0	2.7	2.0	2.7	1.9	2.2

Таблица В.21 - Расчетная максимальная высота волны у Курыка по сценарию SSP5.85

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2015	2.9	1.8	2.0	2.4	2.2	1.9	3.0	2.1	2.2	2.0	2.2	2.8	2.8	3.0	1.8	2.3
2016	1.5	2.2	2.1	1.7	1.7	2.3	2.7	2.0	2.8	2.2	2.4	1.7	1.7	2.8	1.5	2.1
2017	1.9	2.5	1.9	2.2	2.1	1.8	2.0	2.0	2.2	2.9	2.4	1.8	2.2	2.9	1.8	2.2
2018	2.3	2.7	2.4	2.2	2.0	2.6	1.8	2.2	2.6	1.9	2.4	2.3	2.6	2.7	1.8	2.3
2019	2.3	2.8	2.9	1.9	1.8	2.6	2.1	1.6	2.3	2.2	2.2	1.7	3.1	3.1	1.6	2.3
2020	1.9	1.9	2.1	1.6	2.0	2.4	2.0	2.2	2.6	1.8	3.0	2.3	1.7	3.0	1.6	2.1
2021	1.9	2.3	2.3	1.9	2.1	2.0	2.0	2.0	1.8	1.9	2.2	2.3	2.3	2.3	1.8	2.1
2022	2.2	2.2	2.2	2.4	1.7	1.6	2.2	2.9	2.4	2.0	2.5	1.7	1.8	2.9	1.6	2.1
2023	1.9	2.1	2.5	2.3	2.0	1.8	2.5	2.2	2.0	2.9	2.1	1.9	1.8	2.9	1.8	2.2
2024	2.2	2.4	2.1	1.5	1.6	2.1	1.8	2.1	2.5	2.0	2.0	2.5	2.2	2.5	1.5	2.1
2025	1.8	2.1	2.0	1.6	2.1	1.8	1.8	1.7	2.3	2.1	2.5	2.6	2.8	2.8	1.6	2.1
2026	2.0	2.2	2.3	2.2	2.0	1.6	2.1	2.5	2.0	1.6	2.5	2.4	1.7	2.5	1.6	2.1
2027	1.6	2.1	1.8	1.8	2.3	2.0	2.5	2.7	2.2	1.8	2.1	2.4	2.2	2.7	1.6	2.1
2028	1.8	2.1	2.4	1.8	1.8	1.7	2.0	2.3	1.9	2.1	2.9	2.4	2.1	2.9	1.7	2.1
2029	3.0	2.3	2.4	2.0	1.4	1.5	2.3	2.5	2.3	2.1	4.0	2.3	2.1	4.0	1.4	2.3
2030	2.1	2.7	2.5	1.6	1.5	2.1	2.1	2.9	2.5	2.1	2.1	2.1	1.9	2.9	1.5	2.2
2031	2.1	2.4	2.4	1.9	1.6	2.0	2.1	2.5	3.0	2.1	2.1	2.2	2.2	3.0	1.6	2.2
2032	2.7	2.1	2.0	2.0	1.7	1.8	2.6	1.6	3.0	1.6	1.9	2.0	2.9	3.0	1.6	2.1
2033	2.4	2.2	2.4	1.9	2.0	1.5	1.7	2.1	3.2	1.9	2.1	2.0	1.6	3.2	1.5	2.1
2034	2.0	2.1	2.2	1.7	1.8	1.6	2.3	2.2	2.9	1.8	3.0	2.1	2.1	3.0	1.6	2.1
2035	1.9	1.9	2.0	1.8	1.5	1.9	2.9	2.7	2.9	1.7	2.5	2.0	1.9	2.9	1.5	2.1

Продолжение таблицы В.21

Год	Наименование модели CMIP6													Статистические характеристики		
	ACCESS-ESM1-5	BCC-CSM2-MR	CESM2	CNRM-CM6-1	CNRM-ESM2-1	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth3	INM-CM4-8	KIOST-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	MIROC6	NESM3	максимум	минимум	Среднее из ансамбля
2036	2.3	2.6	2.4	1.5	1.9	2.3	1.9	2.1	1.9	2.3	2.0	3.0	2.0	3.0	1.5	2.2
2037	2.6	2.9	1.8	1.8	1.9	2.0	2.6	2.8	3.0	1.7	2.4	2.3	2.4	3.0	1.7	2.3
2038	2.9	2.1	2.7	1.7	2.6	1.9	2.6	2.1	2.1	2.7	1.9	3.3	2.0	3.3	1.7	2.4
2039	2.1	2.4	2.1	1.8	2.1	1.9	1.8	1.7	2.3	1.8	1.8	1.7	2.2	2.4	1.7	2.0
2040	1.7	2.2	2.2	2.3	1.9	2.0	2.3	2.2	2.1	2.2	2.4	2.1	1.9	2.4	1.7	2.1
2041	1.8	1.9	2.2	2.0	1.7	1.8	2.2	2.2	1.9	2.1	1.6	2.3	2.1	2.3	1.6	2.0
2042	2.2	2.3	2.2	1.6	1.7	1.8	1.9	2.3	1.9	2.9	2.2	2.0	2.0	2.9	1.6	2.1
2043	1.6	1.9	1.8	2.5	1.8	1.8	1.9	2.2	2.1	2.0	2.2	2.0	1.7	2.5	1.6	2.0
2044	2.2	2.3	2.2	2.0	1.8	2.0	2.4	2.6	1.9	2.3	1.9	2.5	2.7	2.7	1.8	2.2
2045	2.2	1.7	2.6	2.5	1.9	2.2	2.1	2.4	2.3	2.2	3.6	2.0	1.9	3.6	1.7	2.3
2046	2.3	2.4	2.4	1.9	1.9	2.0	1.6	2.0	2.0	2.1	2.6	2.2	1.6	2.6	1.6	2.1
2047	2.2	2.4	1.8	2.2	1.8	2.0	2.3	2.4	2.1	1.9	1.9	1.8	2.7	2.7	1.8	2.1
2048	2.6	2.2	2.8	2.1	1.7	2.2	2.3	1.8	2.0	1.6	2.0	1.8	1.5	2.8	1.5	2.1
2049	1.9	2.3	1.7	1.8	1.6	2.0	2.2	1.8	1.8	2.2	2.0	1.7	1.7	2.3	1.6	1.9
2050	2.2	3.2	2.1	1.6	1.6	2.3	1.9	2.7	2.2	3.6	2.3	2.5	1.6	3.6	1.6	2.3

