

На правах рукописи

Наурызбаева Жанар Куанышевна

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ
СЕВЕРНОГО КАСПИЯ**

Специальность: 25.00.30 - Метеорология, климатология,
агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Пермь – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ)

Научный руководитель: **Лобанов Владимир Алексеевич**,
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Холопцев Александр Вадимович**, доктор географических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Севастопольского отделения ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова.

Шкляев Владимир Александрович, кандидат географических наук, доцент, профессор кафедры метеорологии и охраны атмосферы ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Ведущая организация: Казанский федеральный университет, 420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

Защита состоится «25» мая 2021 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета Д 212.189.10 при ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, email: meteo@psu.ru, факс (342)239-63-54.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научной библиотеки Пермского государственного национального исследовательского университета. Электронная версия текста диссертации и автореферата доступна на сайте ПГНИУ по адресу: <http://www.psu.ru> и официальном сайте ВАК РФ.

Ваш отзыв об автореферате просим направить по адресу: 614990, г. Пермь, ГСП, ул. Букирева, 15, ПГНИУ, диссертационный совет Д 212.189.10. Ученому секретарю Балиной Т.А., e-mail: t_balina@mail.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук,
доцент Татьяна Анатольевна Балина



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Северная акватория Каспийского моря ежегодно покрывается льдом, в то время как Средний Каспий покрывается только в умеренные и суровые зимы. Продолжительный холодный период наблюдается в северо-восточной части Северного Каспия до 5 месяцев, а в северо-западной части – на месяц меньше. Вопросами формирования ледового покрова Каспийского моря, его динамикой, естественными факторами воздействия обеспокоены многие исследователи ближнего и дальнего зарубежья. В связи с глобальными и региональными климатическими изменениями в последние десятилетия вопрос о современном и будущем состоянии ледового покрова на Каспийском море приобрел статус особого внимания.

Мощность и подвижность ледового покрова сказывается на многих отраслях, в том числе на судоходстве, промысловой и промышленной деятельности, на функционирование береговых гидротехнических сооружений. В то же время любые работы на море и обустройство прибрежной инфраструктуры требуют огромных капитальных вложений. В связи с этим, возникает необходимость проведения исследований ледового режима и его особенностей.

Ледовый покров моря воздействует не только на морские отрасли, но и на экологическую ситуацию в регионе. Биологические циклы экосистем чувствительны к колебаниям дат ледового периода. Раннее появление льда или позднее очищение моря ото льда может влиять на живых обитателей водоема. Уменьшение толщины и площади льда, продолжительности ледового периода, рост торосов и припая оказывает существенное влияние на основные жизненные циклы каспийского тюленя, который является эндемиком Каспийского моря.

Прогнозирование толщины льда и его изменения, положение кромки льда важны для деятельности человека, работы судов и ледоколов, для промышленности, экологического и биологического мониторинга, гидрометеорологических исследований, т.к. все они зависят от ледового периода.

Объект исследования: климатические изменения и их влияние на ледовый режим Северного Каспия.

Предмет исследования: Влияние современных изменений климата Прикаспийского региона на ледовый режим Северного Каспия.

Цель работы: оценить влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия на основе данных наблюдений и результатов физико-математического моделирования.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

1. Сформировать базу данных, как по характеристикам ледового режима Каспийского моря, так и по климатическим факторам за многолетний период и осуществить анализ ее качества и однородности.

2. Осуществить оценку изменений различных характеристик ледового режима на основе применения статистических моделей временных рядов.

3. Дать оценку влияния современного изменения климата на факторы ледового режима Каспия и установить взаимосвязи с показателями атмосферной циркуляции.

4. Разработать методику краткосрочного прогноза нарастания толщины льда и оценить ее эффективность.

5. Получить зависимости, связывающие максимальные толщины льда с климатическими факторами и выбрать наиболее эффективную физико-математическую модель климата для Северного Каспия.

6. Скорректировать сценарные оценки климатических характеристик для выбранной эффективной модели климата и получить пространственно-временные закономерности будущих характеристик ледового режима до конца 21 века.

Положения, выносимые на защиту:

1. В современный период наблюдается уменьшение ледовых явлений Каспийского моря.

2. Основными причинами уменьшения ледовых явлений Каспия являются изменения характера атмосферной циркуляции и рост зимней температуры воздуха.

3. Эффективный краткосрочный прогноз нарастания толщины льда основывается на сумме отрицательных температур воздуха.

4. Согласно климатическим проекциям предполагается уменьшение максимальной толщины льда Северного и Среднего Каспия до конца столетия.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Впервые выявлен переход от одного стационарного режима к другому для характеристик ледового режима Северного и Среднего Каспия за многолетний период.

2. Установлены причины изменений характеристик ледового режима, которые связаны со сменой форм атмосферной циркуляции для рассматриваемого региона и соответствующими изменениями в климатических факторах.

3. Разработана методика и проведена апробация краткосрочного прогноза нарастания толщины льда для северо-восточной части Каспийского моря.

4. Дана оценка будущих изменений максимальной толщины льда Каспийского моря до конца 21 века на основе выбора наиболее подходящей модели климата и зависимостей между температурой и толщиной льда.

Теоретическая значимость результатов состоит:

- в разработанной методике комплексной оценки климатических изменений и характеристик ледового режима Каспия и их метеорологических факторов;

- в выявленных причинах климатических изменений, связанных с изменением атмосферной циркуляции в северо-западной части евразийского континента;

- в разработке эффективной методики краткосрочного прогноза нарастания толщины льда для северо-восточной части Каспия;

- в выборе наиболее эффективной модели климата для региона Каспийского моря и получении на ее основе будущих характеристик ледового режима.

Практическая значимость исследования состоит:

- в сформированной региональной гидро-климатической базе данных, которая проверена на однородность и может быть использована для исследовательских работ Казгидромета и любых других научных и проектных организаций;

- в апробированной методике краткосрочного прогноза суточной толщины льда в казахстанском секторе Каспия, которая внедрена в оперативную практику прогнозов Казгидромета;

- в использовании полученных климатических изменений характеристик ледового режима и их факторов в настоящем и будущем любыми заинтересованными организациями в таких областях как: исследовательские работы по Каспийскому морю, нефтегазовая промышленность, судоходство, рыбное хозяйство, экологический и биологический мониторинг.

Внедрение в производство: получен акт внедрения результатов диссертационного исследования от 20 апреля 2019 г. «Региональным центром гидрологии Центральной Азии, корпоративный фонд». Получен акт внедрения в производство Управления гидрометеорологических исследований Каспийского моря Научно-исследовательского центра РГП «Казгидромет». С ноября 2020 г. по предложенной методике в тестовом режиме производится прогноз. Оправдываемость, которого за зиму 2020-2021 гг. для Пешного составила 98 % на сутки, а на 3 суток - 92 %. Для Жанбая: на сутки - 97 %, на 3 суток – 83%.

Апробация результатов: научная секция Научно-исследовательского центра РГП «Казгидромет» (выписка из протокола №5 от 20 января 2020 г.); CLIMAR-5 Fifth JCOMM Workshop on Advances in Marine Climatology Гамбург, Германия, 2019 г.; конференция к 100-летию со дня рождения М.А. Петросянца, Гидрометцентр России, 2019 г.; региональный центр Гидрологии Центральной Азии, 2019 г., Алматы; International Symposium on Water and Land Resources in Central Asia, 2018, Almaty; Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». РГГМУ, Санкт-Петербург, 2019 г.; XV и XVI Ежегодный большой географический фестиваль БГФ-2019 и БГФ-2020. Санкт-Петербургский Государственный университет, Институт наук о земле, Санкт-Петербург, 2019 г. и 2020 г.; Международная научная конференция студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ЭЛЕМІ». Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, 2019 г.; Вторая Всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», Иркутск, Россия, 2019 г.; Международная научно-практическая конференция «Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы». Воронеж, Россия, 2019 г.; VIII и IX Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование: MARESEDU 2019 и MARESEDU 2020, Москва, Россия, 2019 г. и 2020 г.; III Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», Санкт-Петербург, Россия, Химиздат. 2019 г.; Всероссийская научная конференция с международным участием «Экология и климат» к столетию М.И. Будыко. Санкт-Петербург, Россия, 2020 г.; Second International Scientific Conference of Young Scientists on "Multidisciplinary approaches in solving modern prob-

lems of fundamental and applied sciences" 2020, Azerbaijan National Academy of Sciences - Baku, Azerbaijan; XXXIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», Борок, 2020 г.; Всероссийская конференция с международным участием "Цифровая география" Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020 г.; Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ» посвященной 90-летию РГГМУ, Санкт-Петербург 2020 г.; Всероссийская научная конференция с международным участием «Земля и космос» к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева, 2020 года, Санкт-Петербург, Россия.

Публикации: результаты исследования представлены в 20 публикациях, в том числе в 2 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, РИНЦ, а также в Ежегодных данных о режиме Каспийского моря, Казахстанское побережье, 2016 г.

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений и списка используемых источников. Общий объем работы составляет 138 страниц, работа иллюстрирована 27 рисунками и 19 таблицами. Список используемых источников содержит 136 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, определены основные положения, выносимые на защиту, обоснованы теоретическая и практическая значимость полученных результатов в ходе научно-исследовательской деятельности.

Первая глава диссертации состоит из 4-х разделов и рассматривает характеристики объекта исследований, исходные гидрометеорологические данные. **Разделы 1.1 и 1.2** посвящены физико-географическому описанию Каспийского моря и его ледового режима, обзору исследований по оценке влияния изменения климата на гидрометеорологический режим Каспийского региона. Изложена история гидрометеорологической изученности региона, приведен перечень мероприятий, мониторингов, международных программ и проектов,

выполняемых в настоящее время. В разделе 1.3 приведены сведения о собранной гидрометеорологической информации, включающей: многолетние ряды среднемесячных и срочных температур воздуха и поверхности воды, максимальные месячные и ежедневные сведения о толщине льда, характерные даты ледового режима, среднесуточные, среднемесячные и максимальные скорости ветра и их направления, месячные осадки, площадь льда и число дней форм общей циркуляции атмосферы (ОЦА) от начала наблюдений по 2019 г. включительно

Расположение гидрометеорологических станций и постов показано на рис. 1.



Рис. 1. Расположение гидрометеорологических станций и постов

Раздел 1.4 рассматривает оценку качества и однородности собранной информации. Первичная информация была обработана, проведен статистический анализ качества и однородности по статистическим критериям Диксона, Смирнова-Граббса, Стьюдента и Фишера и осуществлено восстановление пропусков наблюдений и приведение рядов к единому многолетнему периоду с последующей оценкой качества и эффективности восстановленных данных. Минимальное значение коэффициента корреляции при восстановлении пропусков и удлинении рядов максимальной толщины льда задавалось $R_{\min} = 0,7$ и для среднемесячных температур воздуха $R_{\min} = 0,85$. В среднем по всем станциям временные ряды максимальной толщины льда увеличились на 12 лет, наибольшее увеличение было на северо-западе – на 23 года.

Глава 2 включает 3 раздела и посвящена оценке климатических изменений характеристик ледового режима. Рассмотрены исторические данные и даны сравнительные характеристики различных по су-

ровости зим. В разделе 2.1 приведена методика исследования, основанная на статистическом моделировании многолетних временных рядов и оценке эффективности нестационарных моделей по сравнению с моделью стационарного среднего. Раздел 2.2 рассматривает оценку изменений максимальной толщины льда. Климатические изменения толщины льда оценивались по эффективности двух моделей нестационарного среднего (линейный тренд и ступенчатые изменения среднего значения при переходе от одного стационарного периода к другому) по отношению к модели стационарной выборки. Результаты моделирования показали, что средние значения во времени лучше всего аппроксимируются моделью ступенчатых изменений (рис. 2).

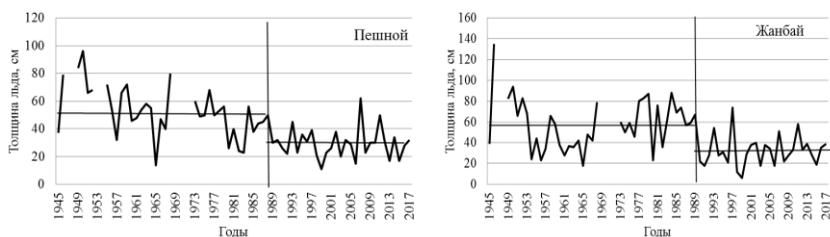


Рис. 2. Многолетние временные ряды максимальных толщин льда и их аппроксимация моделью ступенчатых изменений

В ходе исследования получены следующие выводы:

- результаты практически не зависят от того по наблюдаемым или по восстановленным рядам проводилось моделирование (за исключением данных по станции Лагань, где продолжительность ряда после восстановления выросла с 19 до 70 лет);

- на всех станциях наблюдается уменьшение максимальной толщины льда и, как правило, это уменьшение имело место в виде ступенчатого перехода от одних стационарных условий к другим, которое датируется в среднем 1988 - 1989 гг. Исключением оказалась станция о. Кулалы, где первое большое уменьшение произошло в 1952 г. (если можно доверять отдельным наблюдениям 1940х годов), а следующее только в 1990 году;

- на станциях Среднего Каспия (о. Кулалы, Форт-Шевченко) средние значения максимальной толщины льда уже уменьшились до критических 20 см и даже 10 см, при которых устойчивый лед в отдельные годы может не формироваться.

Согласно полученным результатам, наименее восприимчивой к потеплению климата оказалась северо-западная часть акватории. Уменьшение максимальной толщины льда для нее составляет от 5 до 11 см, что меньше естественной изменчивости, и средняя толщина льда составляет уже около 20 см.

Наиболее суровым по зимним условиям является северо-восток, уменьшения толщины льда превышают СКО (среднее квадратическое отклонение) на 10-30%. Средняя многолетняя максимальная толщина льда уменьшилась на 20-28 см и составляет в настоящее время 32-41 см. На станциях Среднего Каспия, если не учитывать аномально толстый лед 1941-44 гг. на станции о. Кулалы, уменьшения толщины льда хотя и сопоставимы с СКО, но многолетние средние уже уменьшились до 13-17 см, что свидетельствует об увеличении вероятности полного отсутствия льда в отдельные годы.

Мониторинг ледовой обстановки по спутниковым наблюдениям позволяют рассчитать площадь льда и оценить динамику изменений. Хотя период спутниковых наблюдений не продолжителен (2007-2019 гг.), но даже по коротким временным рядам можно выявить уменьшение площади льда в январе, феврале и марте. Причем за период в 13 лет площадь льда в январе и феврале уменьшилась примерно на 30%, а в марте почти на 70%.

В разделе 2.3 проведена оценка изменений характерных дат ледового режима и продолжительности ледового периода. Период ледостава уменьшился в Северном Каспии в среднем на 18 дней (Пешной) и на 27 дней в Среднем Каспии (о. Кулалы). Причем в Среднем Каспии существенно увеличилось количество зим с отсутствием устойчивого ледостава с 28% до 48% от общего числа зим. Уменьшение периода ледостава обусловлено тем, что дата начала ледостава стала позже на 13 дней для Пешного и на 5 дней для о. Кулалы, а дата окончания наступает раньше на 6 дней для Пешного и на 22 дня для о. Кулалы. Дата появления первого льда в Пешном стала позже всего на 4 дня, а на о. Кулалы – на 24 дня и даже переходит на январь следующего года. Дата же максимальной толщины льда в Пешном сместилась на 13 дней к началу года, а на о. Кулалы не изменилась.

В большинстве случаев изменения пока меньше, чем СКО и только по крайним датам ледового режима на о. Кулалы превышают или равны ему.

Глава 3 посвящена оценке климатических изменений факторов ледового режима, включает 4 раздела, которые рассматривают основные факторы: температура воздуха, направление и скорость ветра, осадки, формы общей циркуляции атмосферы. **Раздел 3.1** рассматривает основной фактор формирования льда - температуру воздуха. Полученные зависимости между максимальной толщиной льда и суммами отрицательных температур за холодный период года имеют коэффициенты корреляции 0,70-0,75.

Анализ многолетних временных рядов сумм отрицательных температур и их аппроксимация стационарной и нестационарными моделями показали, что наиболее эффективной является модель ступенчатых изменений с резким изменением температур в конце 1980х, так же, как и для рядов максимальных толщин льда (рис. 3).

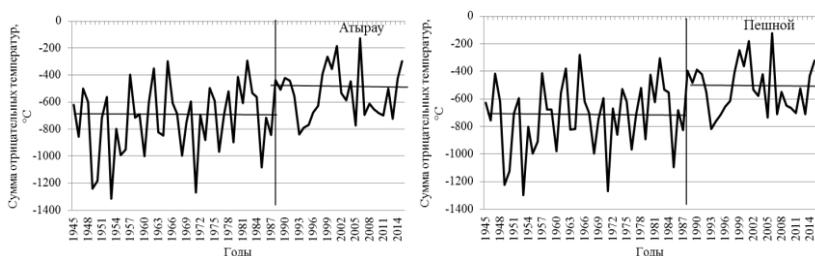


Рис. 3. Многолетние временные ряды сумм отрицательных температур за зимний период на метеостанциях Атырау и Пешной и их аппроксимация моделью ступенчатых изменений среднего значения

Из графиков рис. 3 видно, что средние суммы отрицательных температур на обеих метеостанциях уменьшились примерно на 200°С, что составляет примерно около 30%.

Если основываться на типизации зим для Каспия по степени их суровости (Тютнев Е.Я. (1975), с дополнениями Валлера Ф.И. (1973) и Бухарицина П.И. (1994)), то зимы в среднем перешли из разряда суровых ($\Sigma T=900-700^{\circ}\text{C}$) в разряд умеренных ($\Sigma T=700-400^{\circ}\text{C}$). Уменьшение суммы отрицательных температур в северо-западном секторе доходит до 40%, а в центральной части еще больше (48% - Форт-Шевченко, 53% - Актау).

Раздел 3.2 рассматривает такой фактор как ветер, который не является явным фактором формирования ледового режима, но влияет на него. Во-первых, направление ветра характеризует направление

переноса воздушных масс. Во-вторых, скорость ветра может ускорить разрушение льда в конце ледостава или наоборот замедлить процесс его образования в начальный период.

Исследование динамики многолетних рядов направлений ветра показало, что ветры западных румбов в последнее время увеличиваются практически во все зимние месяцы. Увеличение повторяемости юго-западных ветров произошло в конце 1980х и, хотя в среднем всего на 5% от общей повторяемости всех ветров, но по сравнению с предыдущим периодом их стало в 1,5 раза больше. По итогам исследования максимальных скоростей ветра установлено, что они значительно ослабли и в последние годы скорости более 20 м/с, а тем более 25 м/с, не наблюдаются.

В разделе 3.3 рассмотрен режим атмосферных осадков. Согласно результатам исследования, осадки на большинстве станций не имеют четко выраженного и статистически значимого тренда уменьшения или увеличения. Станции северных, северо-восточных и восточных частей рассматриваемой территории отличились большим количеством выпадения осадков в декабре, январе и марте.

В разделе 3.4 представлена общая циркуляция атмосферы, ее изменения и влияние на метеофакторы. Рассматривались многолетние временные ряды числа дней с формами циркуляции W, C, E с 1891 по 2018 гг. и установлено, что ступенчатые изменения имеют место в конце 1980-х годов в формах W, E, а форма C практически остается без изменений. Суммарное количество дней с формой W за холодный период увеличилось в среднем с 32 до 51 день, а число дней с E уменьшилось с 61 до 40 дней, т.е. в 1.5 раза в обоих случаях. Если же рассматривать вклады трех разных форм в %, то вклад E в последний период времени уменьшился в среднем примерно с 55% до 35%, а вклад W увеличился в среднем с 20% до 40%, т.е. в 2 раза. Поэтому зимы с конца 1980-х годов стали существенно теплее из-за роста влияния теплого атлантического воздуха и уменьшения числа холодных воздушных масс, приходящих из Сибири.

Глава 4 посвящена разработке методики краткосрочного прогноза нарастания толщины льда и оценке ее эффективности. **В разделе 4.1** приведен обзор существующих методов прогноза ледовых явлений на Каспийском море. **Раздел 4.2** рассматривает предлагаемую методику краткосрочного прогноза нарастания толщины льда для северо-восточного сектора Каспийского моря.

Разработка прогнозных зависимостей суточного нарастания льда осуществлялась для станций Пешной и Жанбай, как наиболее репрезентативных морских станций. В качестве исходной информации рассматривались ежедневные наблюдения за нарастанием и уменьшением льда в течение периода ледостава и среднесуточной температурой воздуха с ноября по март в течение непрерывного периода с осени 2007 г. по весну 2018 г., что включало 11 зимних периодов. Кроме этого, была привлечена информация о скоростях и направлениях ветра, температуре воды за каждый срок наблюдения.

Алгоритм методики состоит в следующем:

1. Построение за каждый j -ый зимний период зависимостей вида $H_i = f(\Sigma t_i)$:

$$H_{ij} = -b_{1j} \Sigma t_{ij} + b_{0j}, \quad (1)$$

где: H_{ij} – толщина льда в i -ый день j -го периода ледостава;

Σt_{ij} – сумма среднесуточных температур на i -ый день от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C в отрицательную область в j -ый период ледостава;

b_{1j} и b_{0j} – коэффициенты уравнения регрессии j -го периода ледостава; $j=1, n$ и n – общее число лет или периодов ледостава.

2. Осреднение коэффициентов b_{1j} и b_{0j} зависимостей вида (1) за многолетний n -летний период и получение общей прогнозной зависимости:

$$H_{ij} = -b_{1cp} \Sigma t_{ij} + b_{0cp}, \quad (2)$$

где: b_{1cp} , b_{0cp} – средние многолетние коэффициенты b_{1j} и b_{0j} за период n лет.

3. Оценка стандартных случайных (σ_{ej}) и средних систематических погрешностей (Δ_j) расчета H_{ij} в каждый j -ый период ледостава на основе наблюдаемых Σt_{ij} по общей прогнозной зависимости (2). Данный вид проверки является проверкой на зависимой информации, т.к. коэффициенты b_{1cp} и b_{0cp} получены по информации по всем n периодам ледостава.

4. Построение $n-1$ общих прогнозных уравнений вида (2), где из осреднения последовательно исключаются коэффициенты b_{1j} и b_{0j} каждого j -го зимнего периода для последующей проверки на независимом от расчетов материале наблюдений.

5. Оценка стандартных случайных (σ_{enj}) и средних систематических погрешностей (Δ_{nj}) расчета H_{ij} на независимом материале в каждый j -ый период ледостава на основе наблюдаемых

Σt_{ij} по общей прогнозной зависимости (2), полученной без этого j -го периода ледостава.

6. Оценка стандартных случайных ($\sigma_{\text{срj}}$) и средних систематических погрешностей ($\Delta_{\text{срj}}$) расчета H_{ij} на независимом материале в каждый j -ый период ледостава на основе прогнозных суточных температур воздуха $t_{ij\text{пр}}$ заблаговременностью 1 сутки по общей прогнозной зависимости (2), полученной без этого j -го периода ледостава.

7. Оценка оправдываемости ежедневных прогнозов толщины льда в каждый j -ый период ледостава как на зависимой, так и на независимой от расчетов информации.

Установлено, что наиболее эффективной для этой цели является линейная зависимость между толщиной льда и суммой отрицательных температур для фазы нарастания льда до максимальной его толщины с полученными коэффициентами корреляции $r > 0,9$.

В разделе 4.3 дана оценка эффективности методики и оправдываемости прогнозов. Руководствуясь наставлением по службе прогнозов (раздел 3, часть III. Служба морских гидрологических прогнозов), оценка оправдываемости прогнозов осуществлялась на независимой информации различной заблаговременности от 1 до 10 суток за каждый зимний сезон всех лет наблюдений. При этом изменение температуры воздуха за период заблаговременности прогноза задавалось фактическим, а не прогнозным.

Оправдываемость суточных прогнозов высокая и составляет в среднем 89-90% при вариации от 82% до 98%, средняя оправдываемость прогнозов с заблаговременностью 3 суток ниже - всего 67% при существенной вариации от 51% до 80%. При прогнозах ледовых явлений методику краткосрочного прогнозирования следует считать эффективной при 75 % оправдываемости. Таким образом, прогноз нарастания толщины льда на северо-востоке достаточно надежен на сутки, может иногда на трое, но не больше.

Разработанная методика была апробирована и для условий фактического прогноза температур воздуха для станции Пешной за период с 2016 по 2019 гг. Суточный прогноз температур воздуха был взят по ближайшей метеостанции Атырау с диапазоном в 2°C и по уравнению связи с суммой отрицательных температур были получены независимые прогнозы суточного прироста толщины льда в диапазоне, но его величина составляла всего 0,2 см и не сказывалась на оценку

оправдываемости. В результате за зимний период 2016-2017 гг. с за-
благовременностью 1 сутки оправдалось 94% прогнозов из общего
числа 72 прогноза; за 2017-2018 гг. – 91% из 56 прогнозов; за 2018-
2019 гг. – 94% из 77 прогнозов.

Глава 5 посвящена оценке будущей максимальной толщины льда
на Каспийском море до конца 21 века. **Раздел 5.1** посвящен обзору
климатических моделей и сценариям. **В разделе 5.2** представлена
разработанная методика оценки будущей толщины льда и
существующие модели климата. Рассмотрены результаты историче-
ского эксперимента и будущих проекций для 10 климатических моде-
лей: пекинского климатического центра, Китай (BCC); канадского
центра моделирования и анализа климата с разрешением T63
(CanESM2); национального центра атмосферных исследований США
(CCSM3.0); центра метеорологических национальных исследований
Франции (CNRM); центра атмосферных исследований Австралии
версии Mk3.5 (Mk3.5 Model); Хэдли центра прогноза климата, Вели-
кобритания (HadCM3); института вычислительной математики РАН,
Россия (INM CM4.0); института Макса Планка, Германия (MPI); япон-
ской модели MIROC3.2 с высоким разрешением (MIROC3.2) и
французской модели CM4 V1 института Лапласа
(IPSL/LMD/LSCE).

Метод исследования включил следующие этапы:

- выбор наиболее подходящей модели климата на основе сопоставле-
ния данных наблюдений и результатов исторического эксперимента
по климатическим моделям за совместный период;
- расчет и корректировка средних многолетних температур воздуха за
будущие 3 периода 21 века (2011-2040гг., 2041-2070 гг., 2071-2100 гг.)
по выбранной наиболее подходящей климатической модели и для раз-
ных климатических сценариев;
- получение пространственных распределений сценарных сумм отри-
цательных температур воздуха за зимний период и сопоставление с
современным их распределением;
- расчет средних многолетних максимальных толщин льда по полу-
ченным эмпирическим зависимостям от температуры на основе сред-
них многолетних сценарных температур;
- получение пространственных распределений сценарных макси-
мальных толщин льда и сопоставление с современным их распреде-
лением.

Раздел 5.3 представляет результаты расчетов и выбор эффективной климатической модели для данного региона. Наиболее подходящими моделями оказались: INM, Hadley, CNRM и BCC.

Наибольшая разность средних многолетних температур отмечается на станциях в степных и полупустынных зонах, достигая 8-11°C. На большей части моря она составляет в среднем 5-6°C.

Систематические погрешности все положительные, то есть имеет место завышение температуры воздуха моделями климата.

В **разделе 5.4** дана оценка сценарных значений среднемесячной температуры воздуха по выбранным подходящим моделям: Hadley и BCC при проекциях RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 и модели CNRM и INM при RCP 4.5 и RCP 8.5.

С учетом градиентных и систематических поправок были рассчитаны сценарные нормы температур за каждый месяц и суммы за весь зимний период по каждой модели климата и для трех периодов будущего. При сопоставлении пространственных распределений, площадь области с суммами температур менее -500°C к концу 21 века уменьшатся более чем в 2 раза и умеренные зимы будут наблюдаться только в северо-восточной части моря. На остальной территории будут преобладать мягкие и очень мягкие зимы.

На основе всех выбранных моделей получено, что по самому благоприятному из сценариев RCP2.6 сумма отрицательных температур уменьшится с сегодняшних -171°C до -80 – -90°C. По среднему сценарию RCP4.5 сумма температур варьирует в больших пределах от -102°C до всего -10°C, причем наименьший рост температур ожидается по модели Hadley, а наибольший – по модели INM. По самому неблагоприятному сценарию RCP8.5 устойчивый лед будет отсутствовать при суммах отрицательных температур -30°C – -44°C уже к середине 21 века.

Оценка сценарных максимальных толщин льда дана в **разделе 5.5**. На всех станциях отмечено снижение толщины льда и наибольшая интенсивность снижения ожидается в последней четверти века. Западная акватория практически не будет покрываться устойчивым льдом, в северо-восточной акватории толщина льда уменьшится до 18-27 см, с максимумом в Атырау до 30 см к концу века. Из сопоставления двух пространственных распределений следует (рис. 4), что в современных условиях устойчивый лед толще 20 см еще занимает значительную площадь Северного Каспия, а в последней трети 21 века

эта площадь уменьшится в несколько раз. Граница кромки льда существенно сместится на север и будет на линии о.Тюлений – Форт-Шевченко.

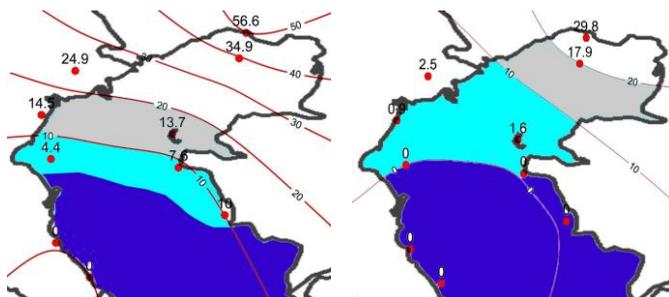


Рис. 4. Пространственные распределения средней максимальной толщины льда (см) за периоды 1981–2010 гг. (слева) и 2071–2100 гг. (справа)

Также получено, что вероятность повторяемости зим без ледового покрова увеличивается и, например, для станции Пешной безледные годы могут быть с вероятностью 1 год за 50 лет в период 2011-2040 гг., а в последней трети 21 века вероятность возрастает до 1 случая в 5 лет. Поэтому вероятность отсутствия устойчивого ледового покрова увеличится в 10 раз.

В заключении диссертационной работы представлены следующие основные результаты и выводы:

1. Сформирована уникальная комплексная гидрометеорологическая база данных по характеристикам ледового режима и их факторам для Каспийского моря и прилегающей территории, осуществлен анализ качества и однородности данных, восстановлены пропуски наблюдений и ряды в разных пунктах приведены примерно к одинаковому многолетнему периоду.

2. На основе анализа и статистического моделирования временных рядов установлено, что максимальная толщина льда уменьшилась на северо-востоке на 20–28 см, на северо-западе Северного Каспия на 20-25 см и на Среднем Каспии - на 13–17 см. Период ледостава уменьшился: в Северном Каспии в среднем на 18 дней (Пешной), в Среднем Каспии - на 27 дней (о. Кулалы). Дата появления первых ледовых явлений на севере стала позже в среднем на 4 дня, а в средней части на 24 дня и даже переходит на январь следующего года. Даты

максимальной толщины льда на Северном Каспии сместились на 13 дней к началу года, а на Среднем Каспии практически не изменились.

3. Проведен анализ и моделирование временных рядов факторов ледового режима и получено, что сумма отрицательных температур уменьшилась с разной интенсивностью в среднем до 200°C и повторяемость мягких и умеренных зим увеличилась. На Среднем Каспии увеличилась повторяемость количества зим с отсутствием устойчивого льда с 28% до 48% от общего числа зим.

Повторяемость ветров западных румбов (З, СЗ, ЮЗ) увеличилась, а максимальные скорости ветра стали меньше. Среднемесячная скорость ветра на станции Пешной до 1980-х годов была в пределах 5-7 м/с, в последние десятилетия она снизилась до отметки 4 м/с.

Установлена взаимосвязь сумм отрицательных температур с показателями атмосферной циркуляции. Суммарное число дней формы циркуляции W за холодный период года имеет ступенчатый переход в 1988 году и увеличилось в среднем с 32 до 51 дня, а число дней с формой E уменьшилось с 61 до 40 дней, т.е. в 1.5 раза в обоих случаях. Вклад формы E уменьшился в среднем с 55 до 35%; вклад W увеличился в среднем с 20 до 40%.

4. Разработана методика краткосрочного прогноза нарастания толщины льда для северо-востока Каспия и оценена ее эффективность. Оправдываемость суточных прогнозов составила в среднем 89–90% при вариации в отдельные годы от 82% до 98%. Методика прогнозирования наиболее эффективна при заблаговременности до трех суток.

5. Разработана методика оценки будущих максимальных толщин льда на основе проекций сумм отрицательных температур и для каждого пункта наблюдений получены эмпирические эффективные зависимости, связывающие максимальные толщины льда и суммы отрицательных температур воздуха за три зимних месяца. На основе сравнения данных исторического эксперимента для 10 моделей климата и многолетних данных в пунктах наблюдений установлено, что наиболее эффективными физико-математическими моделями климата для Северного Каспия являются модели INM, Hadley, CNRM и BCC.

6. Скорректированы сценарные оценки среднемесячных температур воздуха и на основе эмпирических зависимостей получены пространственно-временные закономерности будущих характеристик ледового режима до конца 21 в. Согласно результатам моделирования,

сумма отрицательных температур уменьшится к 2100 г. и умеренные зимы будут наблюдаться только в северо-восточной части моря.

Устойчивый лед толщиной более 20 см будет только на северо-востоке Каспия. Уменьшение рассчитанных по эмпирическим зависимостям сценарных максимальных толщин льда составит 10–15 см, что приводит к отсутствию ледостава уже к середине столетия по моделям INM и CNRM. Граница кромки льда сместится на 150–200 км к северу. Повторяемость безледных зимних периодов существенно увеличится даже в северо-восточном секторе Каспия в 8–10 раз, т.е. будет составлять 8–10 безледных зим на 100 лет.

Публикации соискателя по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Лобанов В.А., Наурызбаева Ж.К. Климатические изменения толщины льда на северном Каспии // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 172–187. <http://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue53/>
2. Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А. Методика краткосрочного прогнозирования нарастания толщины льда в северо-восточном секторе Каспийского моря // Географический вестник. 2020. № 3 (54). С. 82–98. <http://press.psu.ru/index.php/geogr/article/view/3733>

В других изданиях:

3. Наурызбаева Ж.К. Макроциркуляционные процессы и их влияние на изменения ледовых явлений Каспийского моря. // Казахский Национальный университет имени аль-Фараби «Вестник. Серия географическая» №2 (57). Алматы «Қазақ университеті» 2020. С. 41–53. <https://bulletin-geography.kaznu.kz/index.php/1-geo>
4. Наурызбаева Ж.К., Лобанов В.А. Изменение ветрового режима северного и среднего Каспия в холодное полугодие. // Ежеквартальный научно-технический журнал «Гидрометеорология и экология» 2020. № 4. С. 36–45
5. Ивкина Н.И., Наурызбаева Ж.К., Клове Б. Влияние изменения климатических условий на ледовый режим Каспийского моря. 2017. <http://www.water-ca.org/article/2589>

6. Ежегодные данные о режиме Каспийского моря. Казахстанское побережье 2016 г. Министерство энергетики РК РГП «Казгидромет», ответ. редактор Ж.К. Наурузбаева, Алматы. 2018. 57 с.
7. Naurozbayeva Zh., Lobanov V.A. Influence of climate change to the ice regime of the Caspian Sea. International Symposium on Water and Land Resources in Central Asia. 2018. Almaty, Kazakhstan. P. 24.
8. Наурузбаева Ж.К. Изменения климата и его влияние на толщину льда Каспийского моря. Материалы Международной научной конференции студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ЭЛЕМИ». Казахский Национальный ун-т имени аль-Фараби, Алматы. 2019. С. 310–311.
9. Naurozbayeva Zh. Influence of climate change to the ice thickness on the Northern Caspian. CLIMAR-5 Fifth JCOMM Workshop on Advances in Marine Climatology. Hamburg, Germany. 2019. P. 36.
www.dwd.de/climar-5
10. Наурузбаева Ж.К., Лобанов В.А. Основные климатические характеристики и ледовый режим Каспийского моря. Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, Россия. 2019. С. 508–520.
11. Лобанов В.А., Маммедов С.А., Наурузбаева Ж.К., Фань Сяо Цинь. Методы и результаты оценки современных региональных изменений климата. Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, Россия. 2019. С. 494–507.
12. Наурузбаева Ж.К. Современное состояние ледового режима Каспийского моря. Труды VIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU 2019». М., 2019. Т.1. С. 260–263. <https://www.maresedu.com/materials>
13. Наурузбаева Ж.К., Лобанов В.А. Особенности климатических изменений в прикаспийском регионе и их влияние на ледовый режим. Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб., Химиздат. 2019. С. 647–651.
14. Naurozbayeva Zh. Climate change and ice thickness on the Caspian Sea. Book of abstracts of Second International Scientific Conference of Young Scientists on Multidisciplinary approaches in solving modern problems of fundamental and applied sciences. 2020. P. 377–378.