УДК 551.50 (556.0)

DOI: 10.34753/HS.2023.5.4.337

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ СРОКОВ ПОЯВЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ КАСПИЯ

Ж. Казыева[1], В.Ю. Цепелев[2]

[1] Норт Каспиан Оператинг Компани (NCOC), г. Атырау, Казахстан; [2] Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

*v*0010200@mail.ru

Аннотация. С целью минимизации ущерба для различных отраслей морской деятельности в северной части Каспийского моря требуется разработка своевременного и точного прогноза дат появления и разрушения ледового покрова. В условиях изменяющегося климата, физико-статистические методы, обычно применяющиеся для разработки такого прогноза, теряют эффективность. Наиболее перспективным методом прогноза гидрометеорологических характеристик является расчет численной гидродинамической модели с использованием ансамблевого подхода. В настоящей работе обосновано использование данных реанализа гидрометеорологических параметров для выявления их прогностических связей с процессами ледообразования. Исследование было проведено на материале данных наблюдений за ледовыми условиями Каспия за 2000–2021 годы. Для прогноза появления льда, с заблаговременностью более месяца, было предложено использовать ансамблевый прогноз, разрабатываемый по модели CFSv2. В работе предложено рассчитывать суммы градусов морозодней по прогностическому ансамблю модели и вычислять вероятность осуществления прогноза календарных дат появления льда. Для проверки предложенного подхода был разработан экспериментальный прогноз процессов ледообразования в акватории северного Каспия на зиму 2020–2021 годов. Прогноз с заблаговременностью 2 месяца

PROBABILISTIC APPROACH FOR FIRST ICE FORMATION FORECASTING IN THE NORTH-EAST OF THE CASPIAN SEA

Zhanna Kazyeva[1], Valery Yu. Tsepelev[2]

[1]North Caspian Operating Company (NCOC), Atyrau, Kazakhstan; [2] Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

v0010200@mail.ru

Abstract. In order to minimise damage to various sectors of maritime activities in the northern part of the Caspian Sea, the development of timely and accurate forecasts for the appearance and destruction of ice cover is required. In the conditions of the climate changing, synoptical and statistical methods typically used for long range forecasts are losing effectiveness. The most promising method for hydrometeorological characteristics forecasting is the calculation of a numerical hydrodynamic model using an ensemble approach. This study justifies the use of reanalysis data of meteorological parameters to identify thir predictive relationships with ice formation processes. The research was conducted based observational data of the Caspian ice conditions from 2000 to 2021. For predicting ice appearance with a lead time of over a month, an ensemble forecast developed using the CFSv2 model was proposed. The study suggests calculating the sums of daily degrees below freezing based on the forecast ensemble of the model and determining the probability of achieving forecasted calendar dates of ice appearance. To verify the proposed approach, an experimental forecast of ice formation processes in the northern Caspian Sea area for the winter of 2020–2021 was developed. The 2-month lead-time forecast showed an error of three days for predicting the first ice appearance relative to the actual dates. The ice cover appearance forecast was developed with an 80 % probability of realization, consistent with observations obtained from the MODIS satellite.

Казыева Ж., Цепелев В.Ю. Вероятностный подход к прогнозу сроков появления ледовых явлений на северо-востоке Каспия // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5. Вып. 4. С. 337–352. DOI: 10.34753/HS.2023.5.4.337.

показал погрешность в три дня для прогноза появления первого льда, относительно фактических дат. Прогноз появления ледового покрова был разработан с вероятностью осуществления 80 % в, что согласуется с данными наблюдений полученными со спутника MODIS.

Ключевые слова: ледообразование; прогноз появления ледового покрова; ансамблевый прогноз; градусы морозодней; реанализ; вероятностный прогноз; космоснимки.

Keywords: ice formation; long-term forecast; ensemble forecast; frost degrees; meteorological reanalysis; probabilistic forecast; satellite images.

Введение

Необходимым условием деятельности морских отраслей хозяйства является учет фактической и ожидаемой ледовой обстановки на морях. Каспийское море относится к частично замерзающим морям северной части которого, ежегодно устанавливается устойчивый ледяной покров. Лед препятствует нормальному судоходству, способствует разрушению береговых гидротехнических сооружений, а также может наносить ущерб нефте и газодобывающему оборудованию.

Для четкого планирования морских операций и с целью минимизации ущерба для различных отраслей морской деятельности необходимо разрабатывать своевременный и точный прогноз дат появления и разрушения ледового покрова. Редкая сеть метеорологических станций, перерывы в рядах наблюдениях привели к недостаточной изученности происходящих климатических изменений в регионе и нарушили закономерности, используемые в физико-статистических методах прогноза.

При составлении прогнозов появления и схода ледового покрова на Каспии как правило используются физико-статистические методы [Думанская, Нестеров, 2009]. Для этого, из большого количества факторов, определяющих сроки или интенсивность наступления того или иного ледового явления, нужно выбрать те факторы, которые являются определяющими для развития ледового явления в данном районе моря. К таким основополагающим факторам прогноза ледовых явлений обычно относят составляющие теплового баланса, климатические особенности региона и влияние атмосферных процессов [Думанская, Котилевская, 2009].

При физико-статистическом подходе к проблеме прогнозирования появления ледового покрова, обычно используется только 2–3 основных предиктора. Применение большого количества предикторов в уравнении сильно усложняет процесс отслеживания влияния изменчивости каждого из предикторов на результат расчета. Температура воздуха и воды за различные периоды, давление в характерных точках либо разность давления, характеризующих направление и интенсивность воздушных переносов обычно используются в качестве основных характеристик, оказывающих влияние на формирование и динамику ледовых процессов [Абузяров, 1974]. В методах ледовых прогнозов учитываются и другие закономерности к которым относятся различные аналоги, основывающиеся на выявлении сходства в развитии синоптических процессов в прогностическом и исторических периодах, методы спектрального анализа процессов, временная и пространственная корреляция и другие [Кудрявая, Серяков, Скриптунова, 1974].

Процессы ледообразования начинаются с того момента времени, когда вода в результате выхолаживания достигает температуры кристаллизации. Это наступает тем быстрее, чем больше теплоотдача воды определяемая, прежде всего, температурой воздушной массы, находящейся над акваторией моря, и чем меньше теплонакопление за предшествующий весенне–летний период, которое определяется температурой воды. При разработке прогноза

осенних ледовых явлений необходимо учесть оба этих фактора. При прогнозе зимних ледовых процессов, таких как нарастание толщины ледового покрова, обычно учитываются два основных фактора – температура воздуха и ветровой режим. На суммарный результат ледонакопления влияет сумма отрицательных температур воздуха, накопленная от дня перехода температуры воздуха через 0 °С до дня, на который прогнозируется ледовая характеристика. Эта величина носит название суммы градусодней мороза, или градусов морозодней, и используется в прогнозах ледообразования. При составлении ледовых прогнозов на Каспии, наиболее доступной и объективной является типизация суровости зим Тютнева Я.А., которая основана на сумме градусодней мороза рассчитываемых для Астрахани (таблица 1) с дополнениями Валлера Ф.И. и Бухарицина П.И. [Бухарицин, 2019].

Таблица 1. Типизация зим на Северном Каспии по степени суровости – сумме градусодней мороза за холодный период по модулю по станции Астрахани

Table 1. Classification of winters by severity based on the sum of daily degrees below freezing in the North Caspian calculated from observations in Astrakhan

Очень Суровая зима (°С)	**Суровая зима (°С)**	**Умеренная зима (°С)**	**Мягкая зима (°С)**	**Очень Мягкая зима (°С)**
Более 900	900–700	700–400	400–100	Менее 100

Для того, чтобы спрогнозировать приземную температуру воздуха, которая используется для расчета сумм градусодней на длительные сроки, в настоящее время используются синоптико-статистические или физико-статистические методы долгосрочного прогноза погоды. Но для разработки любого физико-статистического прогноза в современных условиях требуется большой архив данных включающий как данные наблюдений, так и такую информацию, как ледовые и синоптические карты, спутниковые снимки, данные ледовой разведки и т.д. В последние десятилетия возникли проблемы в использовании физико-статистических прогнозов. Климатические изменения и, следовательно, изменения характера ледовых условий морей, приводят к нарушениям ранее полученных статистических зависимостей [Лобанов, Наурозбаева, 2021]. В связи с этим является необходимым:

– проверка ранее выявленных статистических выводов и связей;

– нахождение новых временных и пространственных связей между ледовыми и метеорологическими параметрами;

– использование прогнозов температуры воздуха и воды, на основе численного, вероятностного, подхода.

Как уже отмечалось выше, редкая наблюдательная сеть и разрывы в рядах наблюдений не позволяют полноценно изучить климатические изменения и переосмыслить статистические связи. Исходя из вышеизложенного, для получения новых статистических связей предполагается использовать ряды гидрометеорологических характеристик, получаемые с использованием гидродинамических моделей из проекта «NCEP/NCAR Reanalysis 1» (далее реанализ).

Наиболее перспективным методом прогноза гидрометеорологических характеристик атмосферы и гидросферы является их расчет по численной, гидродинамической модели. Но при прогнозе на большие сроки и этот метод обладает высокой степенью неопределенности, основными причинами которой, так же является ограниченность возможностей наблюдений за состоянием среды и погрешностей ее моделирования. По своей природе атмосфера является хаотической средой, чрезвычайно чувствительной к незначительным возмущениям. Поэтому неточность описания начального состояния атмосферы и гидросферы приводит к множественности решений в результате интегрирования численной модели с небольшими отклонениями в начальных данных. В этом случае использование ансамблевого подхода позволяет

определять степень неопределенности прогнозов, связанных с использованием численных моделей атмосферы [Цепелев, Анискина, 2022].

Основная идея ансамблевого подхода состоит в использовании группы прогнозов, рассчитанных при различных начальных условиях моделирования. По характеру распределения членов полученного ансамбля можно оценить вероятность возникновения альтернативных сценариев развития процессов атмосферы и гидросферы и определить степень неопределенности их прогноза. В зависимости от величины вероятности возникновения неблагоприятных сценариев развития процессов, пользователь может заранее принимать различные защитные меры минимизирующие риски [Гилл, 2008].

В настоящей работе нами предложен метод долгосрочного прогноза появления льда, на акватории северо-восточной части Каспийского моря, на базе вероятностного, ансамблевого прогноза приземной температуры воздуха, получаемого по численной модели CFSv2. В методе предлагается рассчитывать сумму градусов морозодней с момента перехода температуры через ноль за осенне-зимний сезон по набору членов ансамбля, выявлять различные прогностические сценарии развития атмосферных процессов, вычислять вероятность их осуществления в северо-восточной части акватории Каспия. Даты появления льда на Каспии предлагается рассчитывать с использованием обновленных статистических зависимостей, полученных на основе материала реанализа.

Физико-географический обзор условий ледообразования Северо-Восточного Каспия

Северо-восточную часть Каспия можно условно разделить на две области – Северную и Среднюю, различающиеся по рельефу дна и гидрологическим особенностям. Условная граница между Северным и Средним Каспием проходит по линии о. Чечень – м. Тюб-Караган. Северный Каспий, несмотря на свою обширную площадь (80 тыс. км), из-за мелководности занимает всего 1 % общего объёма воды, заполняющей Каспийскую впадину. Восточная часть Северного Каспия является почти изолированным водоёмом, с наибольшей глубиной до 5 м, с сильно изрезанной береговой чертой.

Каспийское море ежегодно замерзает в мелководной северной части. Глубокие районы Среднего Каспия всегда свободны ото льда. В начале развития ледового покрова быстрое перемещение границы молодого льда, увеличение площади и толщины припая обусловлены термическими факторами и определяются, главным образом, атмосферными процессами. В холодные зимы лед обычно образуется в крайней северо-восточной части моря в начале ноября. К концу ноября ледообразование охватывает все северо-восточное побережье. В первой декаде декабря лёд заполняет все мелководные районы Северного Каспия. К концу декабря ледообразование распространяется в более мористые районы несмотря на то, что в них процесс протекает медленнее из-за больших глубин и подтока более тёплых вод. В тёплые зимы первый лёд образовывается только в конце января в устье реки Урал.

Из-за различных климатических условий в разных районах Каспия наблюдается неоднородность развития ледовых процессов. Так северо-восточная часть Каспийского моря подразделяется на:

– Акваторию, находящуюся северо-восточнее о. Кулалы и ежегодно покрывающуюся устойчивым льдом с припаем;

– Акваторию, практически ежегодно покрывающуюся плавучим или неустойчивым по подвижности льдом;

– Акваторию включающую прибрежные районы восточного побережья Среднего Каспия, в которой наблюдается образование местного льда или поступление мощного плавучего льда из Северного Каспия.

Каждый год вдоль всего северо-восточного побережья образуется припай. Площадь, занимаемая плавучим льдом, невелика и составляет полосу не более 15–30 км и окаймляет границы припая. В октябре с повышением температуры воздуха в периоды оттепелей, а также под действием ветра и волнения молодой лед раннего ледообразования быстро разрушается. Повторное образование более

устойчивого ледового покрова происходит через 15–30 дней.

Согласно статистическим данным средняя многолетняя толщина льда в Северном Каспии изменяется от 25–30 до 60 см, в суровые зимы в отдельных районах она может достигать 130 см, а для наслоенных льдов её величина составляет 2–3 м. В годы с кратковременным притоком холодного воздуха на акваторию моря и чередованием в течение предзимья и зимы волн холода и потеплений может наблюдаться многократное появление и исчезновение льда [Бухарицин, 2019; Емельянов и др., 1992].

Изменение общей площади льда в течение ледового сезона, а также характер ледовых условий в зимний сезон определяются действием двух факторов - термического и динамического. Динамический фактор (ветер, волнение, течение) вносит коррективы в состояние ледового покрова. Под воздействием ветра совершается взлом неподвижного льда, в результате чего резко уменьшается площадь припая и увеличивается площадь плавучего льда. Термический фактор отвечает за распространение процессов ледообразования, увеличения площади и толщины припая по акватории моря, а также ослабления или разрушения ледового покрова. Числовым показателем термических условий служит сумма градусодней мороза с октября по март [Емельянов и др., 1992].

Сроки начала ледообразования на Каспии зависят от типов атмосферных процессов в предзимье. Распространение холодных арктических воздушных масс сопровождается усилением северных ветров и резким понижением температуры воздуха до –5... –7 °С. В случае сохранения морозов через 1–2 дня на мелководьях образуется лед, что происходит обычно в середине или в первой декаде октября. Лед раннего ледообразования в виде сала и заберегов неустойчив и с наступлением потепления быстро разрушается.

Образование льда на Северном Каспии в сроки, близкие к норме начинается в первой половине ноября с мелководных северо-восточных районов побережья и распространяется к третьей декаде ноября на предустьевое взморье Волги, а к концу ноября на все мелководные районы. В течение декабря процесс ледообразования охватывает мористые районы Северного Каспия.

В аномально и экстремально теплые предзимья над Каспием устанавливается ясная погода со слабыми ветрами, сопровождаемая ночным радиационным выхолаживанием и понижением температуры воздуха до отрицательных значений. Охлаждение водных масс протекает медленно и процесс ледообразования вдоль всего мелководного северного побережья происходит лишь во второй половине декабря. На мористых участках Северного Каспия в экстремально теплые зимы ледообразование может задерживаться до первой половины января. В экстремально холодные предзимья первый лед у восточного побережья образуется в конце октября.

Диапазон колебания сроков начала ледообразования в прибрежных районах Северного и Среднего Каспия в экстремально холодные и теплые зимы составляет 1,5–3 мес. Промежуток времени между датами первого появления льда и полного замерзания назван «периодом становления льда». В средние по суровости морозов зимы продолжительность периода становления льда составляет 15–25 дней в северо-восточной и 20–40 дней в северо-западных частях моря.

Устойчивый ледяной покров образуется в среднем через одну- две недели, после начала ледообразования. Ранние и поздние сроки полного и окончательного замерзания в Северном Каспии отмечаются в широком временном диапазоне — от второй половины октября до второй половины января. Первое полное замерзание в мелководном северо-восточном районе в умеренные зимы наступает до начала декабря. Устойчивое замерзание наступает на 10 дней позже. В экстремально холодные зимы припай (полное замерзание) в Северном Каспии устанавливается вслед за началом ледообразования. В такие годы период становления льда не превышает 5–10 дней. В экстремально теплые зимы процесс замерзания в Северном Каспии запаздывает на 20–25 дней [Гидрометеорология и гидрохимия …, 1992].

Исходные данные и методы

Район данного исследования – северо-восточная часть Каспийского моря, протянувшаяся от 40 ° до 50 ° с. ш. и от 45 ° до 56 ° в. д.

Данные наблюдений получены с метеорологической станции Пешной (Атырауская область, Казахстан), расположенной на побережье северной части Каспийского моря (51,68° в.д. и 46,92° с.ш.). В качестве исходных баз данных были выбраны временные ряды среднесуточных температур воздуха и параметры ветра за период с 2000 по 2021 гг. с октября по март[1], находящиеся в свободном доступе.

В связи с редкой сетью морских гидрологических постов получение детальных данных о ледовом покрове Каспия возможно только с использованием космоснимков. Для определения дат появления ледового покрова использовался визуальный анализ космических снимков с оптических (MODIS, Landsat, и Sentinel-2) и радарных сенсоров (Sentinel-1) размещенных в свободном доступе на сайтах NASA[2], USGS[3] и COPERNICUS[4]. По спутниковым данным был подготовлен ряд дат появления ледового покрова за период с 2001 по 2021 гг. (таблица 2). Погрешности установления этих дат определяются частотой космической съемки акватории Каспийского моря и могут достигать нескольких дней, что связано с:

– отсутствием ежедневных снимков с оптических спутников MODIS, Landsat, в связи с наличием облачного покрова, препятствующего наблюдениям за льдом;

– доступностью данных со всепогодных радарных сенсоров Sentinel-1 только начиная с 2015 г.

По данным наблюдений за период 2000–2021 гг. самая ранняя дата первого появления льда была зафиксирована 07 ноября 2011 г., а самая поздняя – 18 декабря 2015 г.. Средняя дата первого появления льда за двадцатилетний период – 27 ноября.

В качестве прогностических метеоданных в исследовании используются прогнозы, получаемые из модели CFSv2 по следующим метеопараметрам:

– приземное атмосферное давление (в гектопаскалях);

– температура воздуха на высоте 2 метра (в градусах Цельсия);

– температура воздуха на уровне 1000 гПа (в градусах Цельсия);

– температура воздуха на уровне 850 гПа (в градусах Цельсия).

Прогностическая модель «Climate Forecast System Ver.2» (CFSv2) выпускается ежедневно в «National Centers for Environmental Prediction» (NCEP). CFSv2 это глобальная модель, в которой учтены взаимодействия атмосфера – океан – суша – морской лед. Пространственное разрешение модели составляет 384x190 узлов сетки, а по вертикали составляет 64 уровня [Saha et al., 2010]. Количество используемых в работе членов прогностического ансамбля 16. Результаты прогнозов доступны в свободном доступе на сервере NCEP[5].

Для получения статистических зависимостей между приземной температурой воздуха и характеристиками ледового покрова, в условиях редкой наблюдательной сети, нами были использованы данные реанализа среднесуточной температуры воздуха выбранные с октября по январь за период с 2000 по 2021 гг. из модели проекта «NCEP/NCAR Reanalysis 2», поддерживаемой в NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, которые были интерполированы в одноградусную сетку [Kistler et.al, 2001].

Данными реанализа приземной температуры воздуха было предложено заменить данные натурных наблюдений. Так как данные реанализа представляют собой оценки реальных данных на основе неравномерно распределенных наблюдений, то соответственно они имеют погрешности. Для оценки погрешностей было

[1] Погода и климат – прогнозы погоды, новости погоды, климатические данные. http://www.pogodaiklimat.ru/

[2] EOSDIS Worldview. https://worldview.earthdata.nasa.gov

[3] https://earthexplorer.usgs.gov

[4] https://scihub.copernicus.eu/

[5] http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/cfs/v2.3/

произведено сравнение хода температуры воздуха по данным реанализа на высоте 2 метра, уровнях 850 и 1000 гПа с данным наблюдений на высоте 2 метра на станции Пешной (рисунок1). Сравнение кривых на графике показало, что ход данных реанализа и их абсолютные значения в большинстве случаев близки к данным наблюдений.

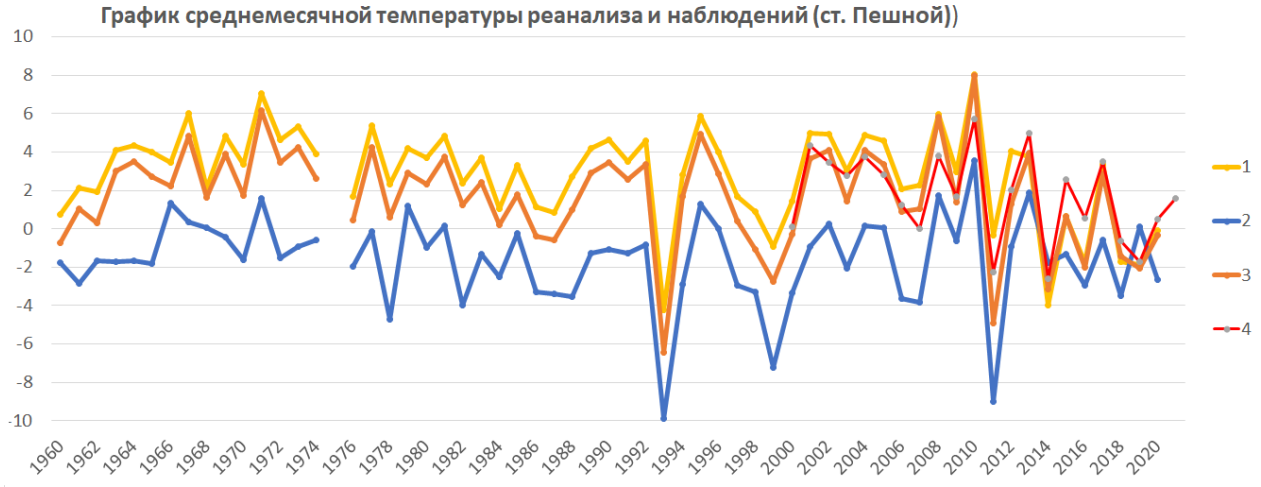

Рисунок 1. Среднемесячная температура атмосферного воздуха в ноябре: 1 – по данным реанализа на высоте 2 м., 2 – по данным реанализа на уровне 850 гПа, 3 – по данным реанализа на уровне 1000 гПа, 4 – результаты наблюдений на высоте 2 м. на станции Пешной за период 2000–2021 гг.

Figure 2. Mean monthly air temperature in November: 1 – reanalysis data at 2 m height, 2 – reanalysis data at 850 hPa level, 3 – reanalysis data at 1000 hPa level, 4 – temperature from observational at 2 m height at Peshnoy station for the period from 2000 to 2021

Результаты

Прежде чем использовать данные реанализа приземной температуры воздуха для расчета сумм градусов морозодней необходимо определить их возможные погрешности. С целью определения погрешностей нами был проведен сравнительный расчет дат установления первого льда с использованием как данных наблюдений, так и данных реанализа. При положительном результате сравнения, данные реанализа позволят корректно заменить данные наблюдательной сети для расчета дат появления первого льда по всей акватории Северного Каспия.

Нами были получены суммы ежедневных градусодней мороза, как по данным полученным на станции Пешной, так и по данным реанализа (таблица 2). По данным полученным из натурных наблюдений средняя сумма накопленных градусов морозодней, необходимых для первого появления льда, составила −15 °С, а для устойчивого появления льда −35 °С. По данным реанализа так же были расчитаны сумма градусов морозодней (таблица 2). Суммы, необходимые для того, чтобы произошло первое появление льда, составили в среднем −6 °С, а для устойчивого появления льда −37 °С.

Корреляция между суммами градусов морозодней, рассчитанными по данным реанализа и данным наблюдений, составила +0,86 для случаев для первого появления льда, а для случаев устойчивого появления льда –+0,94.

Наибольшая разница между рассчитанными датами первого появления льда по наблюдениям и реанализу наблюдается в 2003–2004 гг. и составляет 11 дней. В 2005–2006 гг. такая разница составила 20 дней, а в 2015–2016 гг. разница составила 19 дней. Для остальных зим, периода 2000–2021 гг., разница составила от 1 до 5 дней.

Таблица 2. Суммы градусов морозодней, рассчитанные для дат первого появления льда и дат установления устойчивого ледяного покрова, по данным натурных наблюдений на станции Пешной и данным реанализа в 2000–2021 гг.

Table 2. Sums of average daily degrees below freezing obtained from the observations at Peshnoi station for the period 2000–2021 and typification of their expression

Годы	Данные наблюдений				Данные реанализа			
	Дата первого появления льда	**Дата устойчивого появления льда (по космо-снимкам)**	**Сумма градусов морозодней на дату первого появления льда**	**Сумма градусов морозодней на дату устойчивого появления льда**	**Дата первого появления льда**	**Дата устойчивого появления льда (по космо-снимкам)**	**Сумма градусов морозодней на дату первого появления льда**	**Сумма градусов морозодней на дату устойчивого появления льда**
2000–01	9 ноя		-24		9 ноя	13 дек	-10	
2001–02	29 ноя		-4		30 ноя	6 дек	-2	
2002–03	30 ноя		-22		30 ноя	4 дек	-3	
2003–04	29 ноя		-7		11 дек	13 янв	0	
2004–05	26 ноя		-5		1 дек	3 янв	-3	
2005–06	8 дек		-15		28 дек	2 янв	0	
2006–07	21 ноя		-17		20 ноя	28 ноя	-17	
2007–08	23 ноя		-32		23 ноя	25 дек	-5	
2008–09	15 дек		-10		16 дек	21 дек	-2,5	
2009–10	8 дек		-17		7 дек	16 дек	-9	
2010–11	3 дек		-18		2 дек	6 янв	-11	
2011–12	7 ноя		-14		7 ноя	3 дек	-9	
2012–13	11 дек		-33		11 дек	14 дек	-8	
2013–14	12 дек		-16		11 дек	19 дек	-18	
2014–15	17 ноя		-24		17 ноя	24 ноя	-10	
2015–16	18 дек	31 дек	-23	-41	29 ноя	30 дек	-31	-35
2016–17	16 ноя	20 ноя	-11	-32	16 ноя	20 ноя	-5	-37
2017–18	26 ноя	5 дек	-6	-34	30 ноя	20 дек	-0,6	-26
2018–19	12 ноя	15 ноя	-5	-25	12 ноя	23 ноя	-6	-25
2019–20	18 ноя	22 ноя	-19	-50	18 ноя	21 ноя	-1,6	-45
2020–21	15 ноя	18 ноя	-6	-31	15 ноя	18 ноя	-5,2	-40,5
2021–22	12 дек	15 дек	-2		10 дек	22 дек	0	-10
Среднее	**27 ноя**	**30 ноя**	**-15**	**-36**	**28 ноя**	**13 дек**	**-5 до -7**	**от -30 до -45**

Таким образом, в 15 % всех рассмотренных случаев сумма градусов морозодней, полученная по данным реанализа, не являлась определяющим условием для ледообразования. В связи с этим необходимо выявить причины несовпадения дат, чтобы учитывать их в дальнейших анализах и прогнозах.

Если проанализировать фактическое состояние ледового покрова в декабре 2005 г. по космоснимкам со спутника MODIS, то на них можно выделить появление льда 8, 19 и 30 декабря 2005 г. (рисунок 2). По снимкам так же видно, что замерзание Каспия проходило неустойчиво. Первый лед появился и растаял 8 декабря, а его окончательное установление произошло в период 27–30 декабря 2005 г. При этом, расчетной датой установления льда по данным реанализа является 28 декабря. Если принять во внимание, что первый лед фактически появился 28 декабря, то расчеты сумм градусов морозодней по данным наблюдений и данным реанализа хорошо согласуются.

Анализ хода среднесуточных температур воздуха за декабрь 2005 г. показывает, что переход через 0 °С произошел 5 декабря, а далее наблюдались близкие к нулю среднесуточные температуры воздуха вплоть до 26 декабря. 27 декабря произошел резкий переход температур через −5 °С и последующее их понижение (рисунок 3). Таким образом, дата перехода через 0 °С и −5 °С корректно отражена в данных реанализа и рассчитанная по этим данным сумма градусов морозодней корректно отражает дату фактического появления льда.

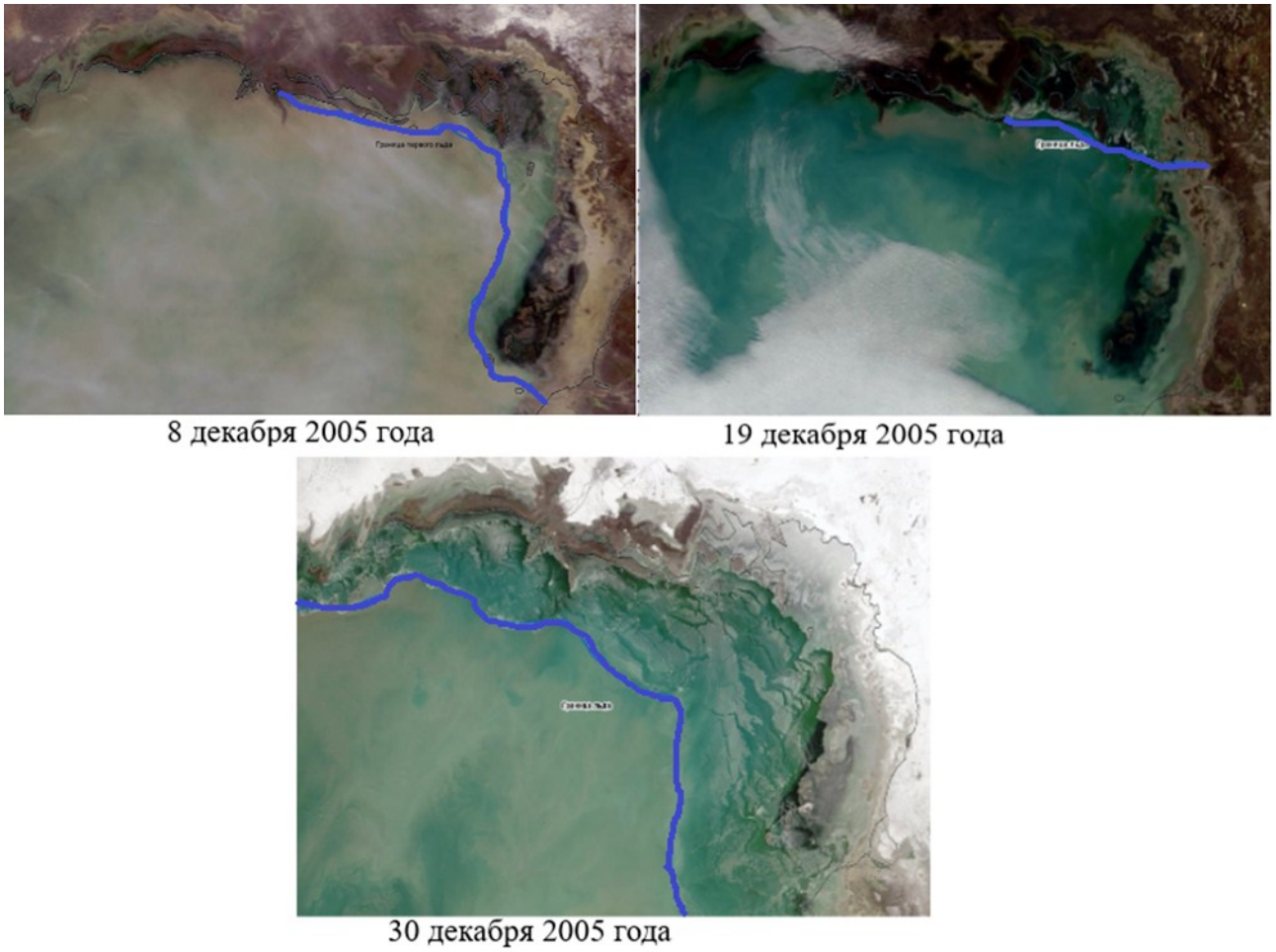

Рисунок 2. Снимки со спутника MODIS за 8, 19 и 30 декабря 2005 г. Синей линией на снимке выделена граница ледового покрова

Figure 2. MODIS satellite images for 8, 19 and 30 December 2005. The blue line on the image shows the ice cover boundary

Зимой 2015–2016 гг. появление первого льда, по данным наблюдений произошло 18 декабря, а по данным реанализа 29 ноября. В соответствии с данными наблюдений, окончательный переход температуры воздуха через 0 °С произошел 28–29 ноября, при этом сумма градусов морозодней достигла −5 °С. В дальнейшем среднесуточные температуры близкие к нулю сохранялись вплоть до 17 декабря. 18 декабря произошло резкое падение

температуры воздуха до -6 °С, которое продержалось несколько дней. Фактически первый лед не мог появиться 28–29 ноября из-за того, что температура воды еще не достигла точки замерзания, и оставалась теплее нормы вследствие того, что в первой половине декабря температура воздуха была выше нормы. Так как расчет дат появления первого льда по данным реанализа не учитывал теплосодержание воды, то дата появления льда была получена неверно. Хотя и существует вероятность того, что появление льда все же произошло в камышовой и прибрежной зоне, невидимой на оптических снимках среднего разрешения (MODIS), затем этот лед быстро растаял при повышении температуры воздуха и усилении ветра. Взятые для расчета данные реанализа показывают хорошее соответствие с фактическим, краткосрочным падением температуры, которое пришлось на 28–29 ноября, что и позволило сумме градусов морозодней достичь −9 – −14°С, достаточной для первого появления льда. Для того, чтобы учесть несогласованность между датами появления льда по данным наблюдений и данным реанализа необходимо в расчетах учитывать температуру воды.

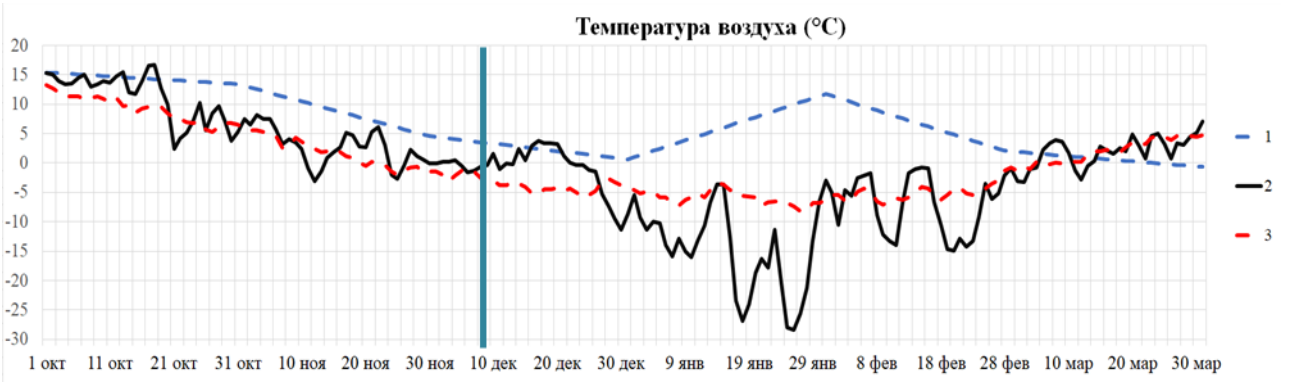

Рисунок 3. Температура атмосферного воздуха на станции Пешной зимой 2005–2006 гг.: 1 – среднесуточная норма, рассчитанная за период 2000–2022 гг., 2 – измерения, 3 – данные реанализа. Дата первого появления льда отмечена синий вертикальной линией

Figure 3. Atmospheric air temperature at Peshnoy station in winter 2005–2006: 1 – average daily temperature calculated for the period 2000–2022, 2 – measured values, 3 – reanalysis data. The date of the first appearance of ice is marked by the blue vertical line

Зимой 2003–2004 гг. разница в датах появления первого льда, рассчитанных по данным наблюдений и данным реанализа составила 12 дней. Фактическое появление первого льда произошло 29 ноября, а по данным реанализа расчетная дата первого появления льда (−6 °С морозодней), пришлась на 11 декабря. Анализ снимков спутника MODIS, показывает появление первого льда 30 ноября и неустойчивое ледообразование вплоть до 11 декабря. Начиная с 12 декабря в прикромочной зоне стал появляться новый лед, а граница льда стала распространяется на запад. В соответствии с наблюдениями переход температуры через 0 °С произошел 29 ноября, когда сумма градусов морозодней достигла почти −5 °С. К 5 декабря сумма накопленных градусов морозодней достигла −21 °С. В период с 6 по 10 декабря наблюдались слабоположительные температуры воздуха от +0,7 до +2,5 °С. В этот период образовавшийся лед не развивался. Начиная с 11 декабря температура воздуха стала понижаться и суммы накопленных градусодней мороза к 12 декабря достигли значения −28 °С, а к 13 декабря −30 °С, что привело к интенсивному развитию процесса ледообразования. Таким образом, расчетная дата появления первого льда по данным реанализа (12 декабря) показывает хорошее соответствие с фактическим понижением температуры воздуха, которое произошло в период с 11–13 декабря.

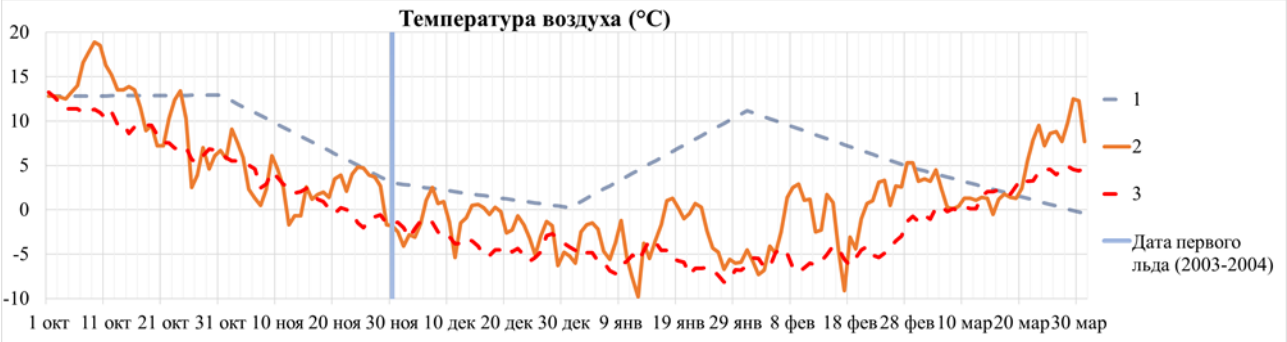

Рисунок 4. Температура атмосферного воздуха на станции Пешной зимой 2003–2004 гг.: 1 – среднесуточная норма, рассчитанная за период 2000–2022 гг., 2 – измерения, 3 – данные реанализа. Дата первого появления льда отмечена синий вертикальной линией

Figure 4. Atmospheric air temperature at Peshnoy station in winter 2003–2004: 1 – average daily temperature calculated for the period 2000–2022, 2 – measured values, 3 – reanalysis data. The date of the first appearance of ice is marked by the blue vertical line

В результате сравнения расчетных дат установления ледового покрова на Каспии по данным реанализа температуры воздуха с фактическими данными наблюдений на станции Пешное и визуальным анализом космоснимков можно сделать следующие выводы:

– Расчет сумм градусов морозодней по данным реанализа хорошо согласуется с данными фактических наблюдений;

– На материале за период с 2000 по 2021 гг. установлено, что при сумме градусов морозодней полученной по данным реанализа и равной −6 °С устанавливается ледовый покров, а при сумме градусов морозодней ниже −37 °С наблюдается его устойчивое установление;

– Расчетные даты установления ледового покрова по данным реанализа отличаются от дат фактического появления льда не более, чем на 5 дней за исследуемый период с 2000 по 2021 гг.;

– Годы, в которых наблюдались существенные отклонения расчетных дат установления ледового покрова от фактических, характеризовались неустойчивым ледовым режимом. В эти годы первый лед после появления быстро разрушался или значительно уменьшался по площади. Фактическое установление ледового покрова соответствовало тем датам, которые были рассчитаны по данным реанализа;

– Для корректного расчета дат установления ледового покрова необходимо привлекать данные по температуре воды;

– Расчет дат устойчивого установления ледового покрова, проведенный по данным реанализа, хорошо соответствует фактическим датам.

Оценка возможности использования ансамблевого прогноза температуры воздуха для расчета дат появления первого льда на Каспии

Для оценки возможности использования ансамблевых прогнозов, разрабатываемых по модели CFS v2, нами был проведен эксперимент по расчету по данным моделирования сумм градусов морозодней. С сервера NCEP были получены ансамбли прогнозов приземной температуры воздуха, рассчитанные 27 октября 2021 г. В расчете было использовано 16 членов ансамбля.

По данным, полученным для каждого из членов прогностического ансамбля, были построены графики сумм градусов морозодней и средний график сумм градусов морозодней по всем членам ансамбля на период 90 дней от момента расчета модели (рисунок 5). При достижении суммы градусов морозодней критической величины в −6 °С предполагается, что на эту дату прогнозируется установление ледового покрова на северо-востоке Каспия.

На дату установления ледового покрова нами были построены карты распределения вероятности его установления на акватории северо-востока Каспия. Для построения таких карт, в каждом узле регулярной сетки данных

рассчитывалось процентное отношение количества членов ансамбля, для которых сумма градусов морозодней достигла критической, к общему количеству членов ансамбля. Это процентное отношение показывает вероятность, с которой в данном узле сетки произойдет установления ледового покрова (рисунок 6).

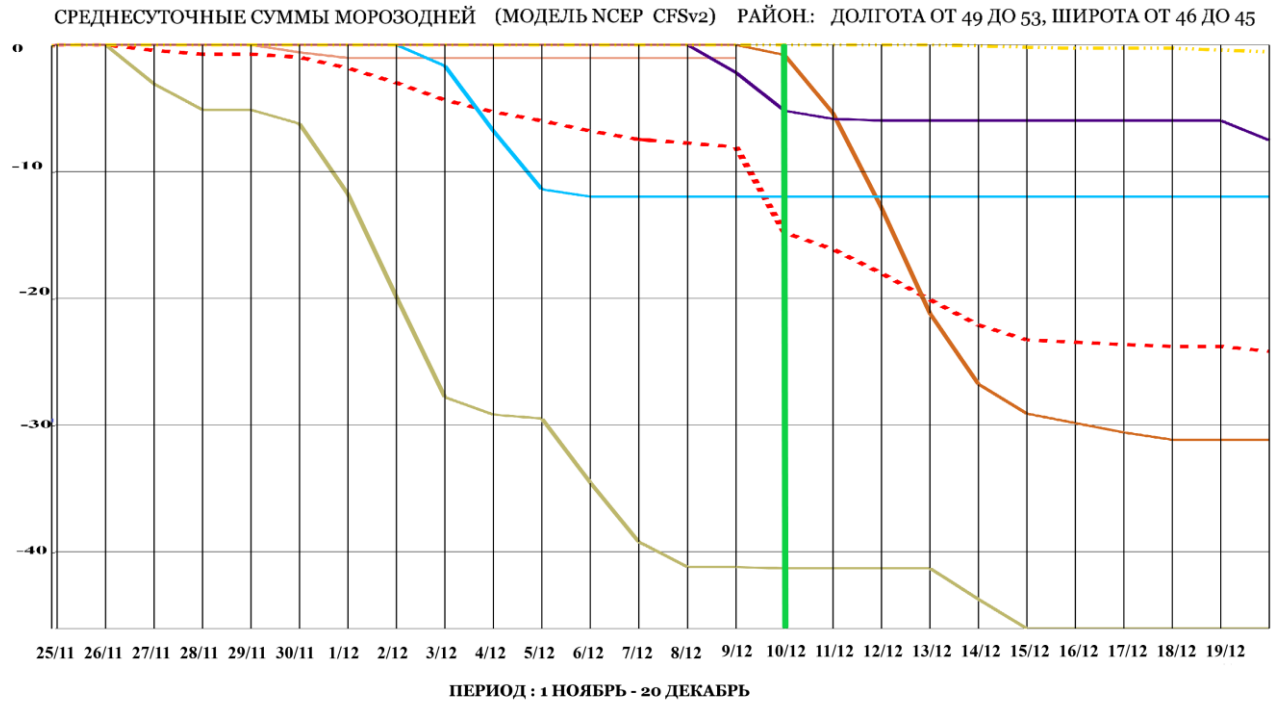

Рисунок 5. График прогностических сумм градусов морозодней за период с 1 ноября по 20 декабря для 8 членов ансамбля модели CFSv2 с датой выпуска 27.10.2021 г. Цветами обозначены графики для четырех членов ансамбля (зеленый, синий, коричневый и фиолетовый цвета). Вертикальная зеленая линия – прогностическая дата появления первого льда. Красная штрихованная линия – среднее по четырем членам ансамбля. Желтая линия – климатическое значение сумм градусов морозодней

Figure 5. Graph of predicted sums of average daily degrees below freezing for the period from 1 November to 20 December for the 8 ensemble members of the CFSv2 model (release date 27.10.2021). Different colors indicate the plots for different ensemble members (green, blue, brown and purple colours). The vertical green line iindicated the predicted date of first ice occurance. The red dashed line is the average of the four ensemble members. Yellow line – climatic value of sums of average daily degrees below freezing

12 декабря 2021 г., в соответствии с наблюдениями со спутника MODIS, на Каспии был зафиксирован первый ледовый покров. Период, для которого рассчитывались суммы морозодней, по прогностическим данным ансамблевого прогноза, был установлен с 27 октября (момента выпуска прогноза) по 20 декабря 2021 г. Накопление сумм градусов морозодней фактически начинается с 26 ноября, так как до этого прогнозировались только положительные температуры воздуха. В соответствии с прогнозом, для разных членов ансамбля, ожидалось накопление сумм градусов морозодней ниже величины −6 °C в период от 30 ноября до 12 декабря. В связи с тем, что методически ансамблевый прогноз выпускается как среднее по всем его членам, то за прогностическую дату появления первого льда можно принять 9 декабря. К этому дню значение сумм градусов морозодней среднее по всем членам ансамбля должно достигнуть −6 °C (рисунок 5). Прогноз установления ледового покрова опережает фактическое его появление на 3 дня (12 декабря) и может считаться успешным.

На карте распределения вероятности установления первого ледового покрова на акватории северо-востока Каспия (рисунок 7) светло-коричневым цветом отмечены районы, для которых суммы градусов морозодней со 100 % вероятностью будут ниже, чем −7 °C. Желтым

цветом отмечены те районы, в которых вероятность того, что суммы градусов морозодней достигнут значения ниже −7 °С составит 80 %. Анализ карты показывает, что с 80 % вероятностью произойдет установление ледового покрова минимум на половине той акватории, для которой составляется прогноз. На космическом снимке со спутника MODIS (рисунок 7) от 13 декабря 2021 г. видно, что границе вероятности 80–100 % соответствует граница появления кромки льда. Таким образом, прогноз пространственного распространения процессов ледообразования, по данным приземной температуры воздуха, полученным из прогностического ансамбля, является успешным.

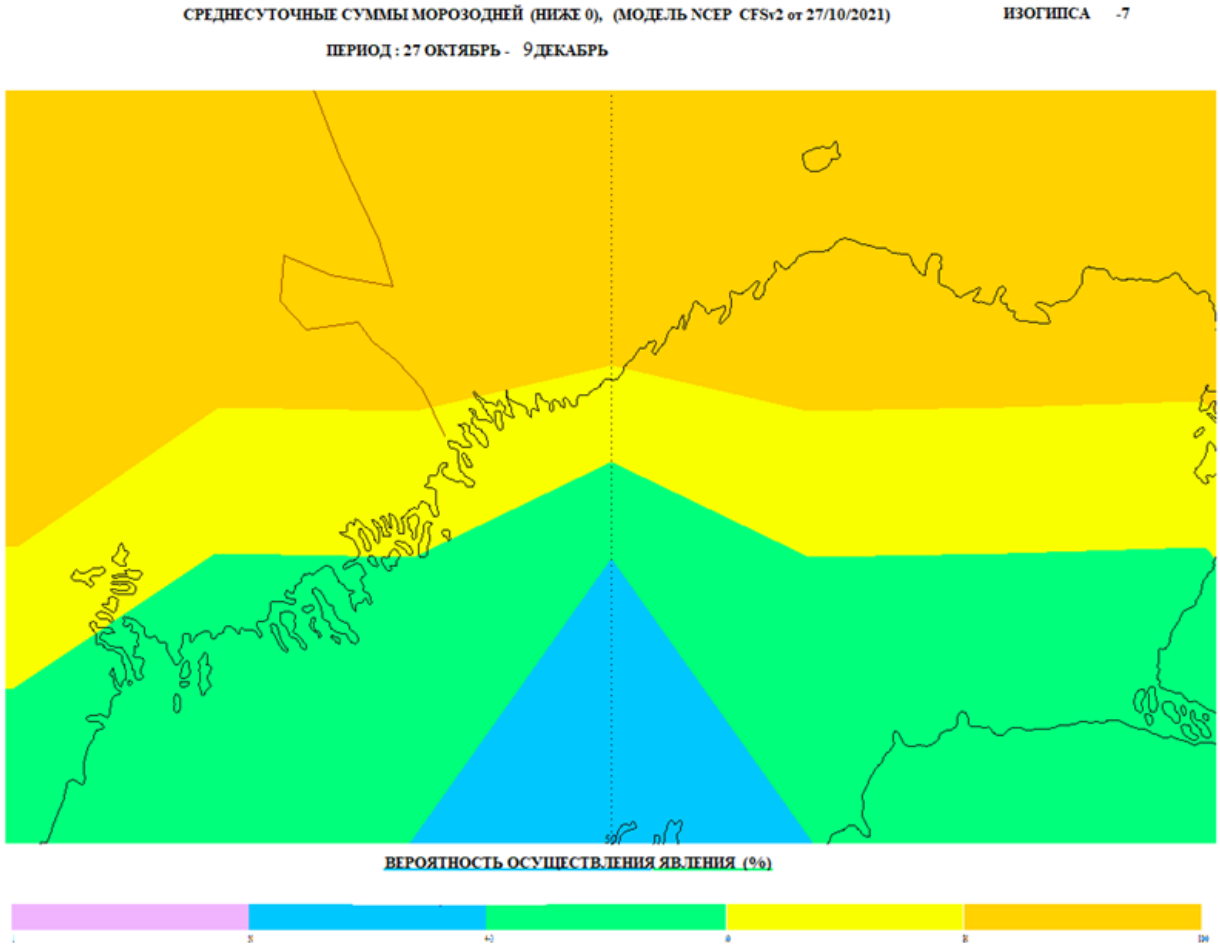

Рисунок 6. Карта распределения поля вероятности превышения суммой градусов морозодней за период с 27 октября (даты выпуска прогноза) до 9 декабря 2021 г., значения −7 °С

Figure 6. Map of the probability distribution of the probability that the sum of average daily degrees below freezing exceeds −7 °C for the period from 27 October (forecast release date) to 9 December 2021



Рисунок 7. Снимки со спутника MODIS на 13 декабря 2021 г. Синей линией обозначена граница появления кромки льда вдоль побережья Северного Каспия
Figure 7. MODIS satellite imagery for 13 December 2021. The blue line indicates the ice edge appearance boundary along the coast of the Northern Caspian Sea

Обсуждение

Мелководная часть северо-востока акватории Каспийского моря может быстро замерзать даже при незначительных падениях температур ниже нуля градусов. Средние суммы градусов морозодней, рассчитанные по данным реанализа за период 2000–2021 гг., необходимые для дат установления ледового покрова составили −6 °С, а для установления устойчивого ледового покрова составили −37°С.

Корреляция между датами первого появления льда, рассчитанными по данным реанализа и данным наблюдений составила +0,81 (за период 2000–2021 гг.).

В 3 случаях из 21, когда расчетные даты установления ледового покрова по данным реанализа отличались от фактических, несовпадения были связаны с неустойчивостью процессов ледообразования. В этих случаях после установления ледового покрова он разрушался или значительно уменьшался по площади, благодаря последующему прохождению волн тепла. Тем не менее, расчеты, проведенные по данным реанализа, корректно выявили даты установления ледового покрова.

Таким образом, использование данных реанализа температуры воздуха для поиска статистических зависимостей и разработки методов прогнозов дат ледообразования на Каспии, показало, что полученные результаты хорошо согласуются с данными наблюдений. Для уточнения прогностических дат установления ледового покрова необходимо учитывать и другие факторы, влияющие на ледообразование – температура воды, скорость ветра, которые не рассматривались в данном исследовании.

Экспериментальный долгосрочный прогноз процессов ледообразования на зиму 2020–2021 гг. с заблаговременностью 1–2 месяца оказался успешным и показал, что:

– Дата установления ледового покрова, рассчитанная по средней, по ансамблю прогнозов приземной температуре воздуха, совпадала с данными наблюдений с погрешностью не более 3 дней;

– Карты распределения по акватории Северо-восточного Каспия вероятности накопления −7 °С сумм морозодней, которое соответствует критическому порогу необходимому для установления ледового покрова, построенные по данным температуры

воздуха полученной из ансамблевого прогноза CFS v2, показывают, что к 9 декабря вероятность установления ледового покрова составит не менее 80 %. Полученный результат не противоречат наблюдениям за ледообразованием по данным космоснимков со спутника MODIS.

Для окончательного вывода по возможности разработки вероятностного прогноза дат установления ледового покрова, с помощью прогностической, метеорологической информации, получаемой из ансамблевого прогноза, необходимо провести дополнительные исследования на материале рефорекастинга модели CFS v2 и данных натурных наблюдений.

Литература

Абузяров З.К. Думанская И.О. Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. Обн.: ИГ–СОЦИН, 2009. 290 с.

Абузяров З.К. Морские гидрологические информации и прогнозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 219 с.

Бухарицин П.И. Исследования каспийских льдов. Кишинев: Palmarium Academic Publishing. 2019, 132 с. ISBN: 978-620-2-38272-4.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР: Проект «Моря» СССР. / *Емельянов Е.М. и др.* // Гидрометеоиздат. СПб., 1992. Т. II. Вып. 1. 450 с.

Думанская И.О. Котилевская А.М. Оценка возможности использования прогностических методик XX века в современной практике ледового обслуживания мореплавания на неарктических морях России // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2009. № 343. 2009. С. 60–78.

Кудрявая Е.Л. Серяков Е.И. Скриптунова Л.И. Морские гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 312 с.

Лобанов В.А. Наурозбаева Ж.К. Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. СПб.: РГГМУ, 2021. 140 с. ISBN 978-5-86813-512-5

Рекомендации по представлению данных о неопределенности прогнозов. / *Гилл Д.* // Всемирная Метеорологическая Организация. Женева., 2008. № 1422. 37 с. ISBN 978-92-63-41091-7.

Цепелев В.Ю. Анискина О.Г. Ансамблевый прогноз: составление, использование, интерпретация: учебное пособие. СПб.:

References

Abuzyarov Z.K., Dumanskaya I.O., Nesterov E.S. *Operativnoye okeanograficheskoye obsluzhivaniye [Operational Oceanographic Services]*. Obninsk: Publ. IG-SOCIN, 2009, 290 p. (In Russian).

Abuzyarov Z.K. *Morskie gidrologicheskie informacii i prognozy*. Leningrad: Publ. Gidrometeoizdat. 1974, 219 p. (In Russian).

Bukharitsin P.I. *Issledovaniya kaspijskih l'dov*. Chisinau: Publ. Palmarium Academic Publishing. 2019, 132 p. (In Russian).

Gill D. *Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting*. Geneva: Publ. WMO, 2012, no. 1091, 32 p.

Dumanskaya I.O., Kotilevskaya A.M. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya prognosticheskikh metodik XX veka v sovremennoy praktike ledovogo obsluzhivaniya moreplavaniya na nearkticheskikh moryakh Rossii. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii*, 2009, no. 343. Pp. 60–78. (In Russian).

Emelyanov E.M., Litvin V.M., Nikitin G.A. Gidrometeorologiya i gidrohimiya morej SSSR: Proekt "Morya" SSSR. St.Petersburg: Publ. Gidrometeoizdat, Vol. Two. Issue 1. 1992, 450 p. (In Russian).

Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M.

The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2001. Vol 82, Issue 2, pp.247–268. doi:10.1175/1520477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2.https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2

Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. 110 с. ISBN 978-5-91155-150-6

Kistler R. Kalnay E. Collins W. Saha S.et.al. *The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation*. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, Vol 82, Issue 2, pp.247-268. doi:10.1175/1520477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2. https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2

Saha S. Moorthi S. Pan H. Wang J. et.al. *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, Vol. 91, Issue 8, pp.1015–1058. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1. https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1

Kudryavaya, E.L., Seriakov E.I., Skriptunova L.I. *Morskie gidrologicheskie prognozy*. Leningrad: Publ. Gidrometeoizdat. 1974, 312 p. (In Russian).

Lobanov, V.A., Naurozbayeva Zh. K. *Vliyanie izmeneniya klimata na ledovyj rezhim Severnogo Kaspiya.* St. Petersburg: Publ. RSHU. 2021, 140 p. (In Russian).

Saha S., Moorthi S., Pan H., Wang J., Han Y., Cucurull L, Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M. *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, Vol. 91, Issue 8, pp.1015–1058. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1. https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1

Tsepelev V.Yu., Aniskina O.G. *Ansamblevyj prognoz: sostavlenie, ispol'zovanie, interpretaciya: uchebnoe posobie.* St. Petersburg: Publ. Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions. 2022, 110 p. (In Russian).