



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Долгосрочный вероятностный прогноз ледовых условий в Каспийском
море по данным ансамблевого прогнозирования»

Исполнитель

Казиева Жанна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Цепелев Валерий Юрьевич

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 17 » февраля 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	1
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Долгосрочные прогнозы (ДП)	7
1.1 Основные понятия	7
1.2 Основные подходы к решению проблемы долгосрочных прогнозов	9
1.3 Методы долгосрочных прогнозов	10
1.3.1 Синоптические методы.	10
1.3.2 Метод аналогов	10
1.3.3 Физико-статистические и статистические методы.....	11
1.3.4 Гидродинамические методы.	12
1.4 Ансамблевый подход.....	14
1.4.1 Реализация ансамблевого подхода.....	16
1.4.2 Типы систем ансамблевого прогнозирования	17
1.4.3 Основные виды прогностической продукции.....	19
2. Оценка возможности использования долгосрочных прогностических методик в современной практике ледового обслуживания	22
3. Физико-географическое описание и ледовый режим казахстанского сектора Каспийского моря	30
3.1 Ледообразование и развитие ледового покрова на Каспийском море ..	35
3.2 Очищение ото льда на Каспийском море	43
4. Используемые материалы	45
4.1 Район исследования	45

4.2 Программное обеспечение и базы данных.....	46
4.3 Базы данных.....	47
5. Анализ и результаты исследования	48
5.1 Используемые данные и методика исследования	48
5.2 Ансамблевые прогнозы первого появления льда для зимних периодов 2020-2021 и 2021-2022 г.г.....	67
5.2.1Прогноз первого появления льда на зимний период 2021-2022	68
5.2.2Прогноз первого появления льда на зимний период 2020-2021	76
ВЫВОДЫ.....	81
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	85
ПРИЛОЖЕНИЕ А	86

ВВЕДЕНИЕ

Ледяной покров является одним из основных факторов, лимитирующих хозяйственную деятельность на замерзающих морях. Необходимым условием деятельности морских отраслей хозяйства и нормальной работы портов и флота является учет фактической и ожидаемой ледовой обстановки на морях. Каспийское море относится к частично замерзающим морям. На северной части Каспийского моря ежегодно устанавливается устойчивый ледяной покров, отличающийся большой динамичностью. Он препятствует нормальному судоходству, способствует разрушению береговых гидротехнических сооружений, а также может наносить значительный ущерб нефте-газо-добывающему хозяйству.

В прибрежных районах наиболее уязвимыми к воздействию льда оказываются мелкие суда рыболовецкого флота, осуществляющие осеннюю путину или подледный лов рыбы. В годы с ранним и резким похолоданием при штилевой погоде на поверхности воды образуется тонкий прозрачный молодой лед - «резун» — толщиной 5—7 см. Под действием ветра поля «резуна» приходят в движение и как бритвой разрезают деревянные рыболовецкие суда и орудия лова.

Не исключено отрицательное воздействие льда и в начале весенней путины. Оно отмечается в годы интенсивного проникновения холодного арктического воздуха на акваторию Каспия в марте, что приводит к резкому переохлаждению водных масс. «Весенний возврат холодов» сопровождается образованием тонкого льда, срезающего рыболовецкие сети и снасти.

На Волго-Каспийском канале при мощных подвижках сжатиях льда разрушаются даже капитальные навигационные ограждения. Преждевременное снятие навигационных знаков на судоходных каналах приводит к частичному или полному прекращению навигации и влечет за собой большие убытки. Следует отметить, что в каналах и фарватерах аварии

судов чаще происходят при поперечных ветрах. Суда, пробивающиеся через лед, «выжимаются» дрейфующими ледяными полями иа бровку и подвергаются сильному напору льда, что приводит к серьезным авариям.

В суровые для восточного побережья зимы осложняется ледовая обстановка в Баутинской бухте, в Красноводском заливе и в портпункте Аладжа. В результате прекращается поток сухогрузов, нефтепродуктов и сырой нефти. Народному хозяйству наносятся миллионные убытки.

Ледовые условия оказывают влияние не только на многие морские отрасли хозяйства, но и на экологическую ситуацию в регионе, например, смещение сроков ледовых явлений оказывает влияние на биологические циклы в экосистемах, что отражается, в свою очередь, на рыбопродуктивности. Известны случаи резкого понижения температуры воздуха, сопровождающиеся интенсивным ледообразованием с последующим укреплением льда. Чрезвычайно неблагоприятная обстановка вызвала массовую гибель водоплавающих птиц.

Редкая сеть метеорологических станций, а также перерывы в наблюдениях в отдельные годы привела к недостаточной изученности климатических изменений этого региона. В исследуемом регионе, так же как в целом по Казахстану, наблюдается значительное потепление климата, повышаются среднегодовые и среднесезонные температуры приземного воздуха, увеличивается повторяемость экстремально высоких температур и продолжительность волн тепла. Такое изменение климата влияет на условия формирования и разрушения ледового покрова на море. (Ивкина Н., 2017)

Для четкого планирования морских операций и с целью избежания ущерба для различных отраслей морской деятельности необходимо разрабатывать своевременный и точный долгосрочный прогноз появления и схода льда.

В настоящей работе предпринята попытка разработки метода долгосрочного вероятностного прогноза появления льда по данным ансамблевого прогнозирования.

Цель работы заключается в определении возможностей использования системы ансамблевого прогнозирования (САП) для разработки методологии долгосрочного прогноза сроков появления льда для северной части Каспийского моря.

Использование САП для долгосрочных прогнозов на месяц и сезон на сегодняшний день является приоритетом развития долгосрочных прогнозов погоды. Для прогнозирования температуры воздуха в настоящий момент используются синоптико-статистические, статистические и гидродинамические методы. Все эти методы имеют приблизительно похожие оценки качества, но перспектива развития и дальнейшего совершенствования наиболее ясно проглядывается только для САП, созданных на базе гидродинамических моделей. Для значительного улучшения качества синоптико-статистических и статистических методов необходимо существенно расширить ряд наблюдений, используемых в методах, что пока сделать невозможно.

1. Долгосрочные прогнозы (ДП)

1.1 Основные понятия

В соответствии с определением, данным Всемирной Метеорологической Организацией, под термином «долгосрочный прогноз» понимают прогноз погоды на сроки от 30 дней до двух лет, формулируемый в терминах отклонений средних месячных, 90-дневных или сезонных значений от климатических значений за тот же период. Прогнозы погоды именно на этих временных масштабах наиболее сильно влияют на повседневную жизнь людей и экономику.

Практические методы долгосрочных прогнозов погоды (ДПП) построены на базе изучения крупномасштабных процессов Общей Циркуляции Атмосферы в конкретном географическом регионе и развития этих процессов в течение длительного промежутка времени. Типичный способ формулировки Долгосрочного Прогноза – прогноз будущих отклонений метеорологических элементов от климатических норм, которые формируются под влиянием отклонений циркуляции атмосферы.

Задача долгосрочного прогноза сводится:

1. Прогноз возникновения глобальных аномалий циркуляции (явление Эль-Ниньо, муссоны, планетарные волны, и т.д.);
2. Прогноз средних метеорологических полей и полей аномалий метеопараметров за длительный интервал времени (месяц, сезон);
3. Прогноз вероятности формирования аномалий метеопараметров того или иного знака на длительном интервале времени.
4. Прогноз будущего режима погоды и его изменений во времени;

К прогнозу режима погоды относится:

- Предсказание будущего типа синоптических процессов;
- Предсказание последовательности смены типов процессов.

Существуют детерминистические и вероятностные долгосрочные прогнозы.

Детерминистические долгосрочные прогнозы обеспечивают единственное вероятное значение для прогнозируемой переменной. Прогнозы могут быть представлены в виде какой-либо вероятной категории (и называться в этом случае категориальными прогнозами, например, равновероятные терцили) или могут иметь форму предсказаний непрерывной переменной (некатегориальные прогнозы). Детерминистический ДП может быть получен в результате одного прогона модели численного прогнозирования погоды (ЧПП) или модели общей циркуляции (МОЦ), или может быть получен на основе общего среднего значения членов системы ансамблевого предсказания (САП), или может быть основан на какой-либо эмпирической модели.

Прогнозы могут представлять собой либо объективные численные значения, такие, как отклонения заданного параметра от нормы, либо указывать на ожидаемое наличие (или отсутствие) событий, классифицированных по категориям (например, «выше/ниже нормы» или «выше/около/ ниже нормы»). Хотя для обеспечения согласованности предпочтительными являются равновероятные категории, аналогичным образом могут использоваться и другие классификации.

Вероятностные долгосрочные прогнозы указывают на степень вероятности наличия или отсутствия события или совокупности тех или иных событий. Эмпирические модели или САП нередко являются основой для вероятностных прогнозов.

Соответствующие события могут классифицироваться по категориям «выше/ниже нормы» или «выше/около/ниже нормы», которые являются предпочтительными. Так же могут использоваться и другие классификации.

Объективные прогнозы обычно предполагают наличие некоторых субъективных предположений. При составлении долгосрочного прогноза

погоды большое значение имеет оценка прогнозиста, который вносит большое количество своих субъективных интерпретаций в объективную прогностическую информацию. Таким образом в любой прогноз – численный гидродинамический, синоптический или статистический, входят субъективные допуски прогнозиста. Субъективным прогнозом называется прогноз, основанный на анализе часто противоречивой и неполной информации.

Создание полностью объективных прогнозов очень затруднительно, так как сложно задать начальное состояние атмосферы и учесть все силы, которые могут на нее воздействовать. Рекомендуется указывать вероятность выпускаемых прогнозов в терминах, которые поясняют степень доверия к нему прогнозиста. Даже если прогноз формально не является вероятностным, прогнозист мысленно строит распределение вероятностей при разработке прогноза. Например, при разработке прогноза осадков, который дается в двух категориях – «есть осадки» и «без осадков» существует распределение вероятности этих событий. Вероятность что событие осуществиться содержит всего два элемента с равнозначной вероятностью. Задача прогнозиста выразить свою степень доверия одному из этих событий. То есть присвоить одному из событий вероятность осуществления равную 100 процентам, а другому событию 0 процентов вероятности.

Применение в прогнозе доверительных интервалов является одним из способов введения вероятностной информации в прогноз метеорологических параметров. Прогнозистом указываются границы прогностического интервала метеорологического параметра и вероятность осуществления прогноза в этом интервале в соответствии с субъективным распределением вероятностей.

С помощью экспертных оценок группы специалистов уровень неопределенности может быть снижен.

1.2 Основные подходы к решению проблемы долгосрочных прогнозов

Большое количество попыток было сделано для создания методов долгосрочных прогнозов погоды большой и малой заблаговременности.

Для решения проблемы долгосрочных прогнозов погоды были использованы различные пути, что обусловило многообразие методов прогноза, основанных на различных принципах и учитывающих те или иные, не всегда главные, особенности атмосферных процессов и циркуляции в отдельных районах северного полушария. Однако оправдываемость прогнозов, составленных с помощью таких методов, была как правило невысокой.

1.3 Методы долгосрочных прогнозов

Было предложено множество принципиальных подходов к решению проблемы долгосрочных прогнозов погоды и создано большое количество методов прогноза.

Существующие методы, в соответствии с заложенными в них физическими принципами и математическими основами, можно разделить на несколько больших классов. Каждый из классов отражает развитие нескольких научных направлений.

1.3.1 Синоптические методы.

В основу синоптического метода положено использование закономерностей преобразования и последовательной смены крупномасштабных особенностей циркуляции атмосферы. Как правило используется принцип аналогичности будущего развития атмосферных процессов. Для использования синоптического метода максимально применяются опыт, интуиция и знания для получения прогноза погоды. К классическим синоптическим методам относятся методы аналогов, ритмов, типов и индексов циркуляции, метод учета Южного колебания, метод мировой погоды.

1.3.2 Метод аналогов

Прогноз по типовым характеристикам часто используется при долгосрочном прогнозировании погоды. В этом случае все процессы разбиваются на классы

(типы). При составлении прогноза, к текущему синоптическому процессу подбирается аналогичный типовой процесс. Аналогичные конфигурации (положения) макросиноптических полей как правило обусловлены одинаковыми физическими причинами, которые и обуславливают дальнейшее сходное развитие процессов. Такие аналоги, отобранные по подобию полей, используются для долгосрочного прогноза.

Замечено, что аналогичные положения макросиноптических полей могут появляться и как промежуточное состояние процессов различной направленности. Однако аналогичные процессы в будущем могут развиваться по разному. Необходимо учитывать не только аналогичность исходных положений, но и аналогичность процесса формирования макропроцессов, так называемая «гомологичность».

1.3.3 Физико-статистические и статистические методы

Физико-статистические методы – это методы, устанавливающие причинно-следственные связи между аномалиями погоды и факторами, влияющими на их возникновение.

Самые первые попытки разработки научных методов долгосрочных прогнозов можно отнести к этому направлению. Физико-статистический подход в настоящее время является главным направлением привлечения новых предикторов, связанных с влиянием внешних факторов на циркуляцию атмосферы и формированием длительных аномалий погоды, использующихся для разработки долгосрочных прогнозов.

Статистические прогностические модели используются для уточнения, коррекции и детализации результатов гидродинамических методов прогноза. Комбинация статистических и численных методов необходима так же для разработки прогнозов в терминах вероятности.

Выделяются пять видов физико-статистического долгосрочного прогноза погоды: (Н.А, 2018)

- Регрессионный метод;

- Метод аналогов;
- Вероятностный метод;
- Экстрополяционный метод;
- Дискриминантный метод.

Синоптико-статистические методы являются разновидностью статистических методов. Метод аналогов является одним из таких методов. Однако в этом методе есть ограничивающий фактор: атмосфера не всегда точно повторяет свое прошлое состояние. Статистические идеи метода заключаются в реализации процедуры поиска и ранжировании найденных аналогов в соответствии с их близостью к текущему процессу.

Классические методы статистических прогнозов погоды могут применяться для оптимизации практического численного прогнозирования и использоваться для расчета численных моделей погоды на срок от месяца и более. В качестве предикторов в таких методах используются результаты расчетов численной модели. Для восстановления прогностических полей применяются статистические процедуры, что делает прогноз комплексным: гидродинамико-статистическим. (В.Ю., Диссертационная работа, 2006) (В.Ю., Курс лекций, 2020)

1.3.4 Гидродинамические методы.

Гидродинамические методы основаны на решении системы гидродинамических уравнений атмосферы с изменяющимися во времени граничными условиями. В настоящее время эти методы применяются в качестве вспомогательных методов, но на практике все больше центров используют гидродинамический прогноз в качестве основного.

Однако и гидродинамические модели имеют свои недостатки. Так, внешние воздействия и динамическая неустойчивость атмосферы приводят к тому, что прогноз последовательных состояний атмосферы ограничен несколькими днями. Два прогноза от исходных условий, которые различаются только небольшой случайной добавкой, постепенно расходятся. Так как

состояние атмосферы вследствие ошибок в наблюдениях, а также интерполяции в районах отсутствия данных всегда содержит некоторую неопределенность, а интерпретация динамических уравнений и параметризация физических процессов только приближительны, то существует верхний предел интервала детерминистического прогноза. Этот предел, составляющий около двух недель, можно рассматривать в качестве предела предсказуемости синоптических масштабов. Однако известно, что за пределами предсказуемости детерминистического прогноза есть и верное решение, но при этом теряется важное условие – условие единственности решения. Потеря единственности приводит и к утрате предсказуемости в связи с тем, что из одного и того же начального состояния модель может прийти в конце к совершенно различным состояниям. Отсутствие синоптической предсказуемости для промежутка времени больше двух недель недостаточно для того, чтобы считать непредсказуемыми некоторые статистические характеристики внутренней динамики, к которым относятся средние за месяц. Возможно, что некоторые компоненты состояния воздушной массы могут сохраняться в нелинейной памяти в течение какого-то времени, превышающего предел детерминистической предсказуемости синоптических масштабов. Отсюда можно сделать вывод, что нелинейная динамическая схема прогноза может предсказать развитие крупномасштабных составляющих на больший период времени, чем процессов синоптических масштабов. Помимо этого, из практического опыта гидродинамических месячных прогнозов известно, что в течение месячного интервала прогноза происходит всего несколько перестроек в атмосферной циркуляции, что определяется как переходы между режимами. Поэтому прогноз на месяц означает прогноз «фаз циркуляционных режимов», или сроков перестроек. Это является одной из самых сложных задач метеорологической науки. При этом расширение промежутка до сезона дает возможность прогноза частот появления основных атмосферных режимов и каких-либо их характеристик

(например, средней продолжительности). (В.Ю., Диссертационная работа, 2006) (В.Ю., Курс лекций, 2020)

1.4 Ансамблевый подход

Ансамблевый подход позволяет перейти от детерминистической формулировки прогноза к вероятностной терминологии. Нужно отметить, что ансамблевый подход применяется только для численных гидродинамических методов.

В практике долгосрочных прогнозов, прогноз по методу ансамблей является набором из двух и более прогнозов разрабатываемых на один и тот же момент времени. Современные прогностические центры ECMWF и NCEP генерируют ансамбль прогнозов, запуская прогностическую модель с различными начальными условиями. Ограничения в мощности компьютеров ограничивают число прогнозов составляющих ансамбль. Соответственно, количество вариантов с различными начальными условиями всегда мало в сравнении с набором возможных состояний атмосферы. Прогностическими центрами отбираются такие варианты начальных условий, которые приводят к наибольшим ошибкам при расчете моделей, что помогает решить проблему. Затем создается ансамбль начальных условий при помощи добавления и вычитания потенциальных быстрорастущих ошибок из данных анализа. В начальный момент времени все члены ансамбля не сильно отличаются друг от друга. Далее, в процессе расчетов, прогнозы, получаемые на выходе модели, будут иметь все больше отличий друг от друга. Ансамбль из 10 прогнозов считается достаточным для того, чтобы заметить улучшение качества прогнозов на 10 дней. В большинстве случаев ансамбль из 30 членов практически полностью описывает процесс. Однако для определения размера ансамбля необходимо учитывать соотношение между увеличением качества прогнозов и затратами на их разработку.

Прогноз по методу ансамблей можно представить в виде единственного прогностического поля путем взвешенного осреднения всех членов ансамбля.

В результате среднее прогностическое поле дает более точный прогноз, чем каждый ансамбль в отдельности. Проведенные исследования, показывают, что среднее по ансамблю поле улучшает качество прогноза только до момента перестройки атмосферной циркуляции. Использование простого осреднения по всем членам ансамбля приводит к сглаживанию мелкомасштабных особенностей, и способно привести к полному искажению реально развивающейся синоптической ситуации. Таким образом, вместе с осредненными по ансамблю картами прогноза так же используются карты стандартного отклонения. Это все характеризует разброс внутри ансамбля, и дает представление об априорном качестве продукции.

На основе ансамблей прогнозов наряду с вероятностной интерпретацией результатов, можно так же получать возможные сценарии развития синоптических ситуаций. Множество метеорологических центров предоставляют такую информацию в виде «карт - почтовых марок», которые являются последовательно упорядоченными прогностическими картами по всему ансамблю или его частям. В случае, если несколько членов ансамбля поддерживают определенный прогностический сценарий, то вероятность осуществления именно этого сценария максимальна. Ансамбли также используются для разработки надежного вероятностного прогноза, который позволит выделять ситуации с высокой и низкой степенью доверия.

При прогнозе на средние и длинные сроки, гидродинамический прогноз по методу ансамблей отличается более высоким качеством, чем один прогноз, полученный по самой совершенной гидродинамической модели. Прогноз по методу ансамблей на 14 дней сопоставим со значимостью обычного численного прогноза на 9 суток. Несмотря на то, что гидродинамические модели постоянно совершенствуются, возмущения, которые возникают в связи с неустойчивостью атмосферы, и определяют в основном ошибку прогноза. (В.Ю., Диссертационная работа, 2015)

1.4.1 Реализация ансамблевого подхода

Ансамблевая система среднесрочного прогноза погоды была реализована в Российской Федерации впервые в 2007—2008 году и основывается на использовании спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России. Система ансамблей включает 20 членов. Планируемое развитие системы включает улучшение разрешения спектральной модели и дополнительное использование конечно-разностной модели, а также увеличение размера ансамбля до 32 членов. Всего для работы системы будет требоваться 1024 процессорных элемента, а каждый экземпляр модели будет считаться на 32 процессорных элементах.

Ансамблевая система прогноза позволяет более точно предсказать состояние атмосферы, и также показывает, где и когда прогноз заслуживает большего или меньшего доверия.

Простейший ансамбль – это совокупность прогнозов, стартующих со слегка различающихся (возмущенных) начальных данных (ансамбля начальных данных).

Ансамбль начальных данных должен:

- Содержать равновероятные члены;
- Являться репрезентативной выборкой из вероятных состояний атмосферы;
- Включать истинное состояние атмосферы (т.е. разброс достаточно велик);
- Возмущения должны быть в пределах ошибок анализа.

Конфигурация ансамблевой системы прогноза

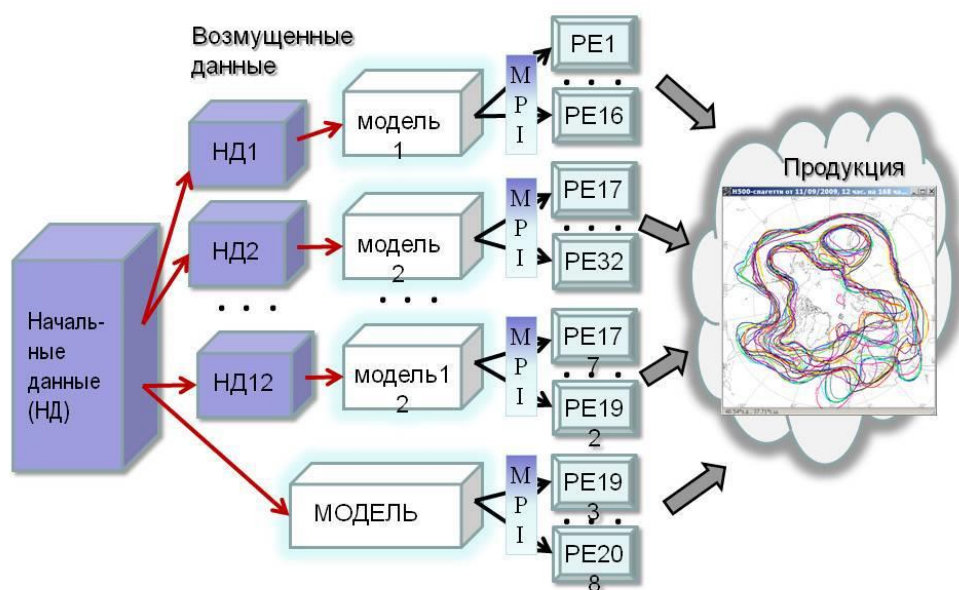


Рисунок 1.4.1.1 Конфигурация ансамблевой системы прогноза

Технологическая схема ансамблевых прогностических систем состоит из следующих этапов:

- 1) Подготовка исходной информации
- 2) Формирование ансамбля начальных состояний
- 3) Интегрирование модели на период прогноза
- 4) Оценка модельного климата
- 5) Обработка результатов выходных модельных данных
- 6) Представление прогнозов
- 7) Верификация прогнозов (ВМО, 2012)

1.4.2 Типы систем ансамблевого прогнозирования

Для применения в прогнозировании погоды - глобального, регионального и конвективного масштабов различают три основных типа систем ансамблевого прогнозирования (САП). Как и в случае с моделями детерминированного численного прогнозирования погоды, они охватывают различные временные масштабы в прогнозе. В каждой из категорий существует множество

вариаций, например, то, каким образом появляются возмущения и как используются модельные вариации в самих моделях. Несмотря на это, принципы использования ансамблей остаются теми же. Ансамбли так же используются для долгосрочного прогнозирования и предсказания климата.

Глобальные системы ансамблевого прогнозирования предназначены и обычно используются для среднесрочного прогнозирования с заблаговременностью 3-15 суток. Они используют глобальные модели численного прогнозирования погоды и прогоняются с низким разрешением с шагом сетки от 30 до 70 км. В первую очередь, они предназначены для использования на средние сроки. Несмотря на это, их глобальный охват означает что они также могут использоваться для подготовки краткосрочных прогнозов в регионах земного шара, где другие системы ансамблевого прогнозирования недоступны, и могут являться единственным доступным вариантом для многих стран. Они широко используются для подготовки продукции в целях поддержки нескольких проектов в рамках Показательного проекта по прогнозированию явлений суровой погоды (ПППСП). Относительно низкая разрешающая способность сетки глобальных САП будет ограничивать детали, которые можно ожидать в прогнозах и это всегда следует помнить пронозистам. Например, такие детали как полная сила скорости ветра во время шторма глобальные САП часто не способны представлять.

Системы ансамблевого прогнозирования на основе региональных моделей или моделей по ограниченному району (ЛАМ) используют региональные модели, то есть охватывают меньшие по площади районы. Такие САП в основном ориентированы на краткосрочный прогноз с заблаговременностью 1 -3 дня. В таких САП используется шаг сетки с более высоким разрешением, чем глобальные САП, как правило от 7 до 30 км. Это позволяет им лучше воспроизводить интенсивные метеорологические системы и прогнозировать больше локальных элементов метеорологических условий. Несмотря на это,

региональные системы ансамблевого прогнозирования не могут прогнозировать элементы мелкомасштабных систем, такие как грозы.

В САП моделей по ограниченному району прогноз прогоняется в течение нескольких часов, прежде чем модель сможет обработать элементы с более высоким разрешением.

1.4.3 Основные виды прогностической продукции

Прогностические системы, основанные на системах ансамблевого прогнозирования, предоставляют возможность производства большого количества выходной продукции. Есть различные способы представления прогностических ансамблей. Одним из самых простых являются карты средних по ансамблю. В практике отмечались случаи устойчивого преимущества при использовании среднего по ансамблю. При использовании простого осреднения по всем членам ансамбля, может произойти сглаживание мелкомасштабных особенностей, что может привести к полному искажению реально развивающейся ситуации. При этом учитывается каждый член ансамбля и роль даже одного члена может оказаться очень важной.

Карты стандартного отклонения, характеризующие разброс внутри ансамбля, широко используются в настоящее время. Они позволяют определить зоны наибольшей изменчивости метеорологических полей и наименьшей надежности прогнозов.

Для визуализации прогнозов могут использоваться карты «спагетти» (spaghetti). На этих картах с помощью характерной изолинии одновременно представлены все члены ансамбля, и карты «почтовые марки» (postage stamps). Эти карты «почтовые марки», в размер почтовых марок, представляют все возможные сценарии развития атмосферных процессов в ансамбле.

Карты распределения вероятностей явлений погоды - аномалий температуры и осадков, снежного покрова и т.д. являются наиболее полным

представлением прогностической продукции. Интерпретация «почтовых марок» оставляется синоптику в апостериорном виде, то есть для внимательного анализа исследователя набора прогнозов по полученному ранее ансамблю, после экстремальных погодных явлений или с целью разбора какого-либо процесса.

Большое количество продукции производится большинством САП непосредственно на основе выходных полей моделей. К основным видам относятся следующие виды продукции.

- 1) Средняя величина по ансамблю. Средней величиной по ансамблю является простое среднее значение параметра между всеми членами ансамбля. Средняя величина по ансамблю обычно лучше обеспечивает проверку оправдываемости, чем контрольный прогноз по наиболее стандартным оценкам оправдываемости, такие как среднеквадратическая ошибка, средняя абсолютная ошибка, коэффициент временной корреляции аномальных значений и т.д. Она сглаживает непредсказуемые элементы и предоставляет более предсказуемые элементы прогноза. Это может помочь предоставить ориентир на элемент прогноза, который можно спрогнозировать с уверенностью, но которому нельзя доверять как таковому, потому что риск наступления экстремальных явлений будет улавливаться редко.
- 2) Разброс по ансамблю. Разброс по ансамблю рассчитывается как стандартное отклонение выходной переменной модели. Он обеспечивает меру уровня неопределенности параметра в прогнозе. Указывается обычно на картах с наложением средней величины по ансамблю.
- 3) Базовая вероятность. Вероятность часто оценивается как простое соотношение членов ансамбля, которые прогнозируют наступление события в конкретном месте или точке сетки. Пример такой вероятности может быть температура воздуха на уровне 2 м, ниже 0° по

Цельсию или более чем одно стандартное отклонение ниже нормы. Базовая вероятность предполагает, что модель точно отражает климатическое распределение наступления события. Вероятностные прогнозы сделанные подобным образом должны проверяться на больших выборках случаев, для определения степени, с которой прогностические вероятности соотносятся с наблюдаемой частотой.

- 4) Квантили. Набор квантилей распределения ансамбля используется для обеспечения краткого описания неопределенности. Как правило используются максимальные и минимальные квантили распределения ансамбля, а также 25-й, 50-й (медиана) и 75-й процентиля. Так же, часто используются 5-й, 10-й, 90й и 95-й процентиля.
- 5) Карты-спагетти. Карты-спагетти показывают несколько выбранных контуров переменных из всех членов ансамбля. Это может дать полезное изображение предсказуемости поля. Если все контуры членов ансамбля расположены близко друг к другу, то предсказуемость считается выше; там, где они выглядят вразброс, предсказуемость ниже.
- 6) Карты-почтовые марки. Карты-почтовые марки представляют собой набор небольших карт, показывающих контурные диаграммы отдельно взятого члена каждого ансамбля. Это помогает прогнозисту рассматривать сценарии в прогнозе каждого члена и оценивать возможные риски экстремальных явлений. Такие карты представляют собой большой объем информации, трудный для анализа.
- 7) Метеограммы. Метеограмма редставляет собой графическое представление одной или нескольких метеорологических переменных во времени, наблюдаемых или прогнозируемых, для определенного места. Выходные переменные модели берутся из сетки для конкретных мест прогноза. Для представления прогноза на местах существует множество представлений, таких как, например, графики шлейфа и вероятности осадков, температуры воздуха и т.д.

2. Оценка возможности использования долгосрочных прогностических методик в современной практике ледового обслуживания

При составлении долгосрочных ледовых прогнозов как правило используются физико-статистические методы. Для этого, из большого количества факторов, определяющих сроки или интенсивность наступления того или иного ледового явления, нужно выбрать те факторы, которые являются главными для развития ледового явления в данное время и в данном районе моря. Основополагающими факторами для прогноза ледовых явлений являются составляющие теплового баланса, климатические особенности региона и влияние атмосферных процессов. Прежде чем начать разработку прогностической методики необходимо проанализировать относительную роль факторов, предшествующих ледовому явлению, с учетом принадлежности к той или иной макроциркуляционной эпохе, сезону года и местным условиям.

Процессы ледообразования и прогнозирование осенних ледовых явлений начинаются с того момента, когда вода в результате выхолаживания достигает температуры кристаллизации льда. Это наступает тем скорее, чем больше теплоотдача воды (определяемая, прежде всего, температурой воздушной массы, находящейся над акваторией моря) и чем меньше теплонакопление за предшествующий весенне-летний период (определяемое температурой воды). Температура воздушной массы, в свою очередь, определяется особенностями макроциркуляции атмосферы и океана, интенсивностью и взаиморасположением центров действия атмосферы (ЦДА)

и т.д. При разработке прогноза осенних ледовых явлений необходимо учесть эти факторы.

При прогнозе зимних ледовых процессов, таких как нарастания толщины и увеличения количества льда, учитываются, как правило, два основных фактора: температура воздуха и режим ветра. На суммарный результат ледонакопления к определенному моменту времени влияет сумма отрицательных температур воздуха, накопленная от дня перехода температуры воздуха через 0 °С к отрицательным значениям до дня, на который прогнозируется данная ледовая характеристика. К таким характеристикам, например, можно отнести даты появления льда или достижение льдом определенной толщины и т.д. Эта величина называется суммой градусодней мороза (СГДМ) или градусы морозодней.

На сегодняшний день наиболее доступной и объективной является классификация, которая основанна на сумме градусодней мороза в Астрахани, (Таблица 1) предложенная Тютневым Я.А. в 1975 году для Северного Каспия с дополнениями в дальнейшем Валлера Ф.И. и Бухарицина П.И. (П.И., 2019).

Типизация зим на Северном Каспии по степени их суровости – сумме градусодней мороза за холодный период по модулю по станции Астрахань

Очень суровая зима (ОС)	Суровая зима (С)	Умеренная зима (У)	Мягкая зима (М)	Очень мягкая зима (ОМ)
Более 900	900-700	700-400	400-100	Менее 100

Таблица 1: Типизация зим на Северном Каспии по степени суровости

В течение всего зимнего ледового периода происходит перераспределение таких площадных характеристик дрейфующего льда, как ледовитость моря и сплоченность льда и увеличивается мощность ледяного покрова.

Прогноз весенних ледовых процессов предсказывает время наступления различных фаз разрушения ледового покрова. Разрушение ледового покрова начинается с того момента, когда тепловой баланс поверхности моря становится положительным. С течением времени инсоляция увеличивается, и таяние льда активизируется. От температуры воздуха над акваторией моря и

мощности ледяного покрова зависит скорость таяния льда. Для характеристики мощности ледового покрова обычно используется ледовитость и толщина льда. Вскрытие и очищение моря ото льда происходит тем раньше, чем интенсивнее таяние льда.

Степень ледонакопления моря также может характеризоваться суммой градусодней мороза.

При разработке методов долгосрочного прогноза ледовых условий рекомендуется учитывать крупномасштабные процессы взаимодействия океана и атмосферы, а также длиннопериодные циклические колебания.

Как отмечают прогнозисты-практики, при статистическом подходе к проблеме долгосрочного прогнозирования, нужно использовать простые прогностические зависимости, если они не противоречат физическим представлениям о процессе. Применение большого количества предикторов в уравнении сильно усложняет процесс отслеживания влияния изменчивости каждого из предикторов на результат расчета. Поэтому имеет смысл использовать только 2-3 основных предиктора.

Температура воздуха и воды за различные периоды, давление в характерных точках либо разность давления, характеризующих направление и интенсивность воздушных переносов обычно используются в качестве характеристик, оказывающих влияние на ледовые процессы.

При разработке методов долгосрочных прогнозов принято придерживаться представлений о преемственности, инерции, аналогичности и цикличности атмосферных и гидрологических процессов. В качестве примера можно привести преемственность от предзимья к зиме, прослеживаемая достаточно четко. Меридиональным процессам в январе-феврале, обуславливающим частые вторжения холодного воздуха на европейскую территорию, предшествуют меридиональные процессы в октябре-ноябре. И, напротив, преобладание западной циркуляции в октябре-ноябре влечет за собой преобладание этой же циркуляции в зимние месяцы.

Инерционность обеспечивают устойчивые процессы в океане и атмосфере. Так, например, малоподвижный зимний Сибирский антициклон провоцирует длительное поступление холодного воздуха на акватории южных морей России, к которым относится Каспийское море. На температуру и влагосодержание воздушных масс, движущихся на материк, оказывает влияние большая устойчивость температурных аномалий в океане.

Одним из основных приемов долгосрочных прогнозов является существующая преемственность в развитии метеорологических процессов. Она проявляется в том, что будущее преобразование изучаемого явления подготавливается совокупностью различных факторов, изменяющихся за длительный предшествующий прогнозу период времени. Причём это происходит на очень больших пространствах. При изучении изменчивости данного явления рассматривается история развития процесса с момента его зарождения и устанавливаются закономерности в этом развитии. Эти закономерности создают условия для возможных преобразований явления в будущем. Так как среди возможных преобразований может быть намечено несколько вариантов развития, то из них выбирают наиболее вероятные преобразования, которые затем и используют в прогнозах.

В качестве примера можно привести вероятные преобразования форм атмосферной циркуляции по Вангенгейму и по Гирсу и влияние этих преобразований на ледовитость арктических морей. В своих работах А. А. Гирс показал, что преемственность синоптических процессов можно применять не только в прогнозах ледовитости и других ледовых явлений, но и в прогнозах колебания уровня и температуры воды в морях.

А. А. Гирс составил также ряд схем. С помощью этих схем можно проследить цепь наиболее вероятных преобразований синоптических процессов при разной заблаговременности при разных ситуациях. Так, например, исходное состояние берется в октябре—ноябре текущего года, а прогнозируемый период относится к июлю—августу следующего года.

Как правило, в прогностических связях не учитывается промежуточная часть непрерывной цепи развития процессов, заключенная между прогнозируемым периодом и периодом исходного состояния. Для того, чтобы это избежать, Гирс рассматривал процессы в их непрерывном развитии и представлял это в виде некоторых последовательностей на любые отрезки времени. Этот способ имеет возможность использования метеорологического прогноза большой и малой заблаговременности хоть и основан на учете преобладания синоптических преобразований.

Также важную роль в морских прогнозах играет динамическая и тепловая инерция водных масс, сущность которой сводится к сохранению морем установившегося состояния.

Для учета инерции сравниваются изучаемый элемент в данный момент времени с его значением в предшествующее время и определяется теснота связи между ними. В некоторых случаях ярко выраженная инерция в процессах может иметь прогностическую ценность.

Например, по данным В. Ю. Визе только на основе учета инерции состояния ледовитости можно предсказать знак отклонения ледовитости от нормы с вероятностью 75%. Успешность прогноза значительно увеличится, если при этом учитываются возможные значения ледовитости при разных типах атмосферной циркуляции.

В долгосрочных прогнозах учитываются и другие закономерности, в которых прогноз погоды не используется в явной форме. К таким зависимостям относятся подборы различных аналогов, которые в свою очередь основываются на выявлении сходства в развитии процесса.

Широкое распространение получили типизация атмосферных и гидрологических процессов и изучение временных рядов наблюдений различной длительности. С помощью рядов наблюдений выявляются основные свойства и характеристики периодических и непериодических

колебаний изучаемого явления, позволяющие экстраполировать выявленные закономерности ряда на будущий период.

Существует еще немало методов исследования прогнозируемых элементов. Помимо вышеперечисленного, в прогнозах широко используются методы спектрального анализа, временная и пространственная автокорреляция, теория случайных функций, и др. С помощью этих методов анализируется изменчивость изучаемых характеристик режима моря, выявляются периодические и непериодические флуктуации различных процессов, а также оформляются количественные прогностические модели. (К.И.Кудрявая, 1974)

Развитие синоптических процессов в течение длительного периода времени (группа лет, год, сезон) и на больших территориях позволяет выявить крупномасштабные процессы. В связи с этим возникает необходимость устанавливать пространственные связи между метеорологическими и ледовыми параметрами.

При разработке методов долгосрочного прогноза ледовых условий учитываются крупномасштабные процессы взаимодействия океана и атмосферы. Все существующие методы долгосрочных ледовых прогнозов можно условно разбить на три группы. В первую группу входят методы, в которых учитываются предшествующие прогнозу гидрологические и метеорологические условия. Это в основном методы прогнозов весенних ледовых условий, в которых одним из главных факторов является количество льда, накопленное за зиму. Ко второй группе относятся методы где используются начальные данные и заданные метеорологические условия, т. е. в явной или скрытой форме входит прогноз погоды.

Для этой группы характерны методы прогнозов осенних ледовых явлений. В третью группу входят методы сверхдолгосрочного прогноза ледовых явлений, где за основу взят учет гелиогеофизических факторов. Физической предпосылкой методов данной группы явилась возможность использования для ледовых прогнозов существующих в природе циклических

колебаний с различными периодами. Перечисленные выше факторы применяются при разработке как физико-статистических, так и гидродинамических методов ледовых прогнозов.

Следует сказать, что климатический анализ и долгосрочный прогноз являются очень сближенными понятиями. Как показывает анализ, вероятностный прогноз — это самый надежный вид статистического долгосрочного прогноза. При этом для разработки любого статистического прогноза в современных условиях требуется хорошо сформированный электронный архив, включающий как табличные данные наблюдений на ГМС, так и систематизированную визуальную информацию, такую как карты, снимки, данные ледовой разведки и т.д.).

В Гидрометцентре России для неарктических морей на ледовый сезон прогнозируются следующие ледовые параметры:

- начало ледообразования;
- максимальную за ледовый сезон ледовитость (положение кромки);
- максимальную за зиму толщину льда по пунктам;
- очищение моря ото льда;
- продолжительность ледового сезона.

Однако в последние десятилетия возникли проблемы, которые связаны с погрешностями прежних статистических зависимостей.

В настоящее время происходят значительные климатические изменения и с изменением характера погоды на акваториях морей меняется характер ледовых условий на этих морях. Прежде всего эти перемены связаны со сменой макроциркуляционных эпох (МЦЭ).

Кроме всего прочего, в лаборатории ледовых прогнозов Гидрометцентра России изучалось, в какой степени связаны с началом и окончанием ледового периода такие предикторы, как переход температуры воздуха через 0 °С (осенью к отрицательным значениям и весной к положительным значениям), часто используемые в прогностической практике. Также с целью возможного

увеличения заблаговременности прогноза определялись коэффициенты корреляции для связи дат первого появления льда с датами перехода температуры воздуха через -5°C осенью. Для весны определялись коэффициенты корреляции для дат окончательного очищения моря ото льда с датами перехода температуры воздуха через $+5^{\circ}\text{C}$.

С учетом изменчивости климатической ситуации в целях определения подхода к разработке методик долгосрочного прогноза является необходимым:

1. Проверка и переосмысление прошлых статистических выводов и связей.
3. Выявление квазиоднородных периодов, определяющие тот или иной тип развития ледовых условий.
4. Нахождение временных и пространственных связей между ледовыми и метеорологическими параметрами.
5. Заложить в статистические модели возможности по реализации периодического корреляционного анализа предикторов, которые входят в уравнения, и корректировки самих уравнений.

Технология долгосрочного прогноза представляет собой ансамблевый метод. Он может включать три самостоятельных компонента для расчета ледовых параметров.

1. Расчет по уравнениям множественной корреляции на базе использования поля приземной температуры воздуха.
2. Расчет по уравнениям множественной корреляции на базе использования характеристик температур воздуха.
3. Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых параметров на гармонические составляющие с последующей экстраполяцией их сумм на предстоящий ледовый сезон. (Думанская И.О., 2010) (Руководство по морским гидрологическим прогнозам, 1994) (Абузьяров З.К., 1974)

3. Физико-географическое описание и ледовый режим казахстанского сектора Каспийского моря

Каспийское море расположено на западной границе Казахстана, между Атырауской и Мангистауской областями, к которым относятся восточные части Северного и Среднего Каспия, 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 5м, берега низкие, равнинные, сильно изрезаны многочисленными заливами и озёрно-лагунными образованиями. Восточная часть Среднего Каспия - глубоководная с глубиной от 50 до 200м, с обрывистыми, с крутыми до отвесности берегами. Здесь выделяется Казахский залив с бухтой Кендерли.

На Северном Каспии зимой при достаточно пониженной температуре устанавливается мощный, устойчивый труднопроходимый ледовый покров, отличающийся большой динамичностью.

Ледовый покров является препятствием нормальному судоходству и может привести к разрушению береговых гидротехнических сооружений. В прибрежных районах уязвимыми к воздействию льда оказываются мелкие суда рыболовецкого флота, осуществляющие осеннюю путину или подледный лов рыбы. Дрейфующие льды создают серьёзную угрозу для судов, затрудняя

их самостоятельное передвижение, а также угрожают постоянным нефтяным сооружениям на море.

Необходимость глубокого анализа ледовых условий диктует огромное влияние ледового покрова, образующегося у берегов и в открытых районах Каспия, на работу различных отраслей народного хозяйства, связанных с морем.

Климат восточной части Северного Каспия определяется особенностями географического положения региона, условиями атмосферной циркуляции, характером подстилающей поверхности и географией берегов. Прилегающие прикаспийские степи и полупустыни имеют огромное влияние на формирование климата данной части Каспия.

На климат прибрежных районов Каспийского моря имеют непосредственное отношение несколько типов воздушных масс: холодные арктические, влажные морские атлантические, сухие континентальные из Казахстана, тёплые тропические со Средиземного моря. Синоптические условия над акваторией Каспия формируются частотой смены воздушных масс.

Каспийское море относится к морям с сезонным ледовым покровом. Из-за различных климатических условий в разных частях моря отличается большой неоднородностью развития ледовых процессов.

По характеру их развития казахстанская часть Каспийского моря подразделяется на несколько районов:

- акватория, находящаяся северо-восточнее о. Кулалы, ежегодно покрываемая устойчивым льдом с припаем, затрудняющим навигацию без проводки ледоколов;

- акватория, практически ежегодно покрываемая плавучим или неустойчивым по подвижности льдом, который дает возможность поддерживать ледокольную навигацию;

- акватория включающая прибрежные районы, бухты и заливы восточного побережья Среднего Каспия, в том числе мелководный Казахский залив, в котором наблюдается образование местного льда или поступление из Северного Каспия мощного плавучего льда.

Как правило Каспийское море ежегодно замерзает в мелководной северной части. Глубокие районы Среднего Каспия всегда свободны ото льда.

В зависимости от особенностей атмосферных процессов, степени аномалий температурных условий в предзимье и зимой, на Каспийском море формируется специфичная для каждого года ледовая обстановка. В основном ледовый период в Каспийском море обозначают тремя естественно-синоптическими сезонами: осень (предзимье) - с октября по декабрь; зиму - с января по март и весну - с конца марта по май.

В начале развития ледового покрова быстрое перемещение границы молодого льда, увеличение площади и толщины припая обусловлены термическими факторами. Начало ледообразования и границы распространения льдов определяется, главным образом, атмосферными процессами на что влияет, в некоторой степени, приток тепла из средней части моря.

В холодные зимы начальное появление льда обычно образуется в крайней северо-восточной части моря в начале ноября. К концу ноября ледообразование очень быстро распространяется по акватории, охватывая все северо-восточное побережье. В первой декаде декабря лёд заполняет все мелководные районы Северного Каспия до трёхметровых глубин. 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 нормальные по температурным условиям предзимья процесс ледообразования в Северном Каспии начинается с мелководных прибрежных участков со второй половины ноября. К концу ноября неподвижным льдом

покрывается все мелководье, в январе ледяной покров охватывает воды открытого моря. В тёплые зимы первый лёд образовывается только в конце января в устье реки Урал.

При этом каждый год вдоль всего северо-восточного побережья образуется морской лёд, прикреплённый к берегу – припай. Даже в очень мягкие зимы северные и северо-восточные берега Северного Каспия покрыты припаем и плавучим льдом. Площадь, занимаемая плавучим льдом, невелика и составляет полосу не более 10-20 миль и окаймляет границы припая. При этом на протяжении всего зимнего сезона льды являются неустойчивыми. В октябре с повышением температуры воздуха в периоды оттепелей, а также под действием ветра и волнения молодой лёд раннего ледообразования быстро разрушается. Повторное образование более устойчивого ледового покрова происходит через 15-30 дней.

Ледовый покров в конце декабря охватывает практически все прибрежные и мористые районы Северного Каспия. Распространение ледового покрова в глубоководные районы моря продолжается в январе, но интенсивность его приращения, по сравнению с декабрем, снижается. Ослабление интенсивности приращения объясняется исходом процесса ледообразования на открытых участках моря, и зависит не только от контактного теплообмена на границе вода - воздух, но и влиянием свободного внутриводного теплообмена с прогретыми глубинными водными массами Среднего Каспия.

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 несколько раз появление и исчезновение льда и, как следствие, резкие колебания его площади.

В период март-апрель образуется и наиболее распространён при общем взломе припая дрейфующий лёд. От вторжения теплого воздуха дрейфующий лёд может частично таять, а в промежутке между первым появлением льда и устойчивым ледообразованием может исчезать полностью. В умеренные и мягкие зимы первый молодой лёд может растаять в первую же оттепель, но затем образуется вновь и этот процесс будет повторяться неоднократно: в умеренные зимы бывает 2-3 повторных замерзания, а в мягкие - от 4 до 10 раз и более.

Во второй половине ледового сезона усиливается влияние на ледовый покров климатических факторов, обуславливающих взлом припая, сжатие и разрежение льда, а также процессы наслоения и торосообразования. В таких случаях нарушается связь площади льда от термических условий. При этом резкое уменьшение площадей припая и плавучего льда происходит даже при сильных морозах, сопровождаемых штормовыми ветрами, вследствие наслоений и образования торосов.

Многолетние исследования и фиксирование статистических данных показывают, что при средних гидрометеорологических условиях со второй половины февраля начинается разрушение льда. Самыми первыми освобождаются открытые районы северного Каспия, затем его северо-восток. Море окончательно освобождается ото льда в конце марта - начале апреля.

В различные по термическим условиям холодные полугодия ледовитость Каспийского моря определяется не только площадью и объемами образовавшегося льда, но и особенностями его развития: устойчивостью его распределения по акватории и сохранением во времени границами распространения ледового покрова, а также преобладанием тех или иных форм и возрастных видов льда.

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 существенные коррективы в состояние ледового покрова: под воздействием ветра совершается взлом неподвижного льда, в результате чего резко уменьшается площадь припая и увеличивается площадь плавучего льда от действия термического фактора, который является преобладающим и обуславливающим в периоды резких или длительных похолоданий распространение процессов ледообразования, увеличение площади и толщины припая по акватории моря, а также ослабление (в середине зимы) или разрушение (в конце зимы) ледового покрова при значительных и устойчивых оттепелях.

В таких случаях числовым показателем термических условий служит сумма градусодней мороза за холодное полугодие с октября по март.

Существование льдов в северной части Каспийского моря в течение почти полугода влияет в значительной мере на его гидрологические условия. При этом кромка льда служит определённой фронтальной зоной, для нее характерна резкая горизонтальная изменчивость гидрометеорологических характеристик. Поверхностные воды в прикромочной зоне мелководного Северного Каспия охлаждаются вплоть до температуры замерзания и это намного увеличивает их плотность. В результате конвективного перемешивания на северном склоне северо-каспийской впадины воды высокой плотности достигают дна и начинают сползать по склону, усиливая зимнюю циркуляцию. (Под ред. Терзиева Ф.С., 1992)

3.1 Ледообразование и развитие ледового покрова на Каспийском море

Сроки начала ледообразования на Каспии зависят от атмосферных процессов в предзимье обусловленных сезонной перестройкой барических полей на высотах и у поверхности земли.

Раннее ледообразование на Каспийском море связано с активизацией арктического максимума к началу октября. В такие годы на высоте поверхности 500 гПа над Скандинавией и севером европейской части СНГ располагается антициклон, гребень которого ориентирован на Балканский полуостров. Над Западной Сибирью (или Уральским хребтом) находится глубокий высотный циклон. Ложбина его ориентирована на запад Казахстана и Малую Азию. Наличие ложбины, ориентированной с северных районов Атлантики на Англию и Италию, обуславливает вынос теплого воздуха с южных районов Средиземного моря на север Скандинавии по западной периферии гребня. В тыл другой, более глубокой ложбины, ориентированной с Таймыра на запад Казахстана и Малую Азию, холодный воздух устремляется с северо-востока на юго-запад.

При указанном высотном барическом у поверхности земли над арктическими морями зарождаются ядра, смещающиеся по полярной и ультраполярной осям на Нижнюю Волгу, Украину и Казахстан.

Распространение на Каспий холодных арктических воздушных масс (АВМ) сопровождается усилением северных ветров и резким понижением температуры воздуха до $-5... -7^{\circ}\text{C}$. В случае сохранения морозов через 1—2 дня лед образуется на мелководьях обычно в середине или в первой декаде октября. Процесс ледообразования начинается либо с северо-восточной части моря, либо с северо-западной, либо вдоль всего северного побережья одновременно.

Вероятность ледообразования в Северном Каспии во второй декаде октября менее 7 %, а в третьей декаде — 10—22 %. Лед раннего ледообразования в виде сала и заберегов неустойчив и с наступлением потепления, подвергаясь тепловым и динамическим воздействиям (ветер, волнение), быстро разрушается. Однако даже кратковременное экстремально раннее (в октябре) ледообразование в каналах и на мелководьях представляет стихийное явление, приводящее к повреждениям деревянного рыболовецкого

флота и орудий лова (18 октября 1949 г.). При повторных похолоданиях ледообразование наступает в сроки, близкие к норме, и носит более устойчивый характер.

В годы, когда ледообразование начинается в конце октября — начале ноября, как правило, высотный глубокий циклон располагается над Средним Уралом (севернее 55° с. ш.), ложбина его ориентирована на Нижнюю Волгу. Высотный гребень над Западной Европой направлен с запада Средиземного моря на Данию и Исландию. При таком барическом поле обеспечивается достаточно сильный перенос холодного воздуха со Скандинавии через центральные районы европейской части СНГ на Нижнюю Волгу. В случае вторжения АВМ со Скандинавии по полярной оси очаги холода стационарируют в северо-западной части моря. Ледообразование, начинающееся на взморье Волги, к концу октября распространяется на северо-восточные мелководные акватории.

В случае мощных затоков холодного арктического воздуха на акваторию моря и распространения его к югу возможно интенсивное охлаждение водных масс до температуры замерзания в закрытых мелководных бухтах и заливах восточного побережья моря. Оно сопровождается экстремально ранним началом ледообразования (в конце октября—начале ноября) в заливе Александр-Бай, в бух. Киндерли и в Красноводском заливе.

Образование льда в Северном Каспии в сроки, близкие к норме (в течение ноября), происходит при любых направлениях вторжения холодного воздуха (по полярным или ультраполярным осям). 13 ноября наблюдаются случаи понижения температуры воздуха до отрицательных значений при прояснениях ночью. Сильному ночному выхолаживанию воды на мелководье, сопровождаемому кратковременным образованием начальных видов льда (ледяные иглы, сало), способствует установление ясной погоды со слабым ветром при температуре воды, близкой к «точке замерзания».

В средние по суровости (нормальные) предзимья ледообразование в Северном Каспии начинается в первой половине ноября с мелководных северо-восточных районов побережья, распространяясь к третьей декаде ноября на предустьевое взморье Волги, а к концу ноября — на все мелководные районы, ограниченные 2—3-метровыми изобатами. В течение декабря менее интенсивно развивающийся процесс ледообразования охватывает мористые районы Северного Каспия.

К югу от 44° с. ж. в умеренные предзимья ледообразование у восточного побережья Среднего Каспия начинается в декабре, т. е. на месяц раньше, чем у западного берега, где местный лед образуется лишь в январе.

В теплые предзимья в декабре на высоте поверхности 500 гПа располагается обширная область пониженного давления, а высотный циклон находится над северными (арктическими) морями. В умеренных широтах устанавливается устойчивый западно-восточный перенос, а над Каспием — юго-западный. В такие годы ледообразование в Северном Каспии происходит лишь в первой декаде декабря.

В аномально и экстремально теплые предзимья в декабре планетарная высотная фронтальная зона (ПВФЗ) распатается квазишироотно над умеренными широтами. Глубокая ложбина над Средней Волгой обуславливает юго-западный перезос воздушных масс над Средним Каспием. При таком высотном переносе у поверхности земли формируются местные ядра и гребни, перемещающиеся из районов Западной Европы через Черное море на Нижнюю Волгу. Над Каспием устанавливается ясная погода со слабыми ветрами, сесрвождаемая ночным радиационным выхолаживанием и понижением температуры воздуха до отрицательных значений. Охлаждение водных масс при подобных ситуациях протекает медленно и процессе 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. Вероятность появления начальных видов льда в январе составляет лишь 5—7%. В северной части, к югу от параллели 44° с.ш., в теплые зимы кратковременное появление в начале марта первого льда происходит при весеннем возврате холодов, обусловленном поступлением АВМ на акваторию Каспия.

В Среднем Каспии вероятность ледообразования изменяется от 33—40 до 85 %, имея тенденции понижения с севера на юг. В районах побережья с интенсивным внутригодовым теплообменом (Дербент, Кара-Богаз-Гол) вероятность ледообразования несколько ниже (55— 60%), чем на смежных участках побережья (65— 85%). В закрытом, мелководном Красноводском заливе теплообмен, которого с водными массами глубоководных районов ослаблен, вероятность ледообразования более высокая (64 %), чем в расположенных севернее участках побережья (Бекдаш - 40 %).

Гидрометеорологические и ледовые условия у западного и восточного побережья Среднего Каспия различные, не совпадают и сроки ледообразования. В умеренные зимы образование льда в восточных заливах Александр Бай (26 ноября) и Кендерли (7 декабря) начинается в конце ноября - первой половине декабря. До середины января процесс ледообразования распространяется на большую часть побережья Среднего Каспия. Исключение составляют приглубые участки западного побережья от Изберга до Дербента, где лед образуется в третьей декаде января.

В экстремально холодные предзимья, обусловленные глубокими затоками АВМ на акваторию Каспия и как следствие резким переохлаждением водных масс, у восточного побережья первый лед образуется в конце октября. В Красноводском заливе ледяной покров ранее середины ноября не образуется. На открытых участках побережья — от Дербента до Низовой Пристани, у прол. Кара- Богаз-Гол и в Туркменском

заливе — даже в холодные предзимья ледообразование начинается лишь во второй половине декабря.

В умеренно теплые зимы ледообразование в закрытых бухтах и заливах Среднего Каспия начинается в первой половине февраля. У открытых западных берегов Среднего Каспия, наряду с местным ледообразованием, в конце февраля — начале марта может наблюдаться малой мощности плавучий лед, вынесенный из северных районов моря.

Диапазон колебания сроков начала ледообразования в прибрежных районах Северного и Среднего Каспия в экстремально холодные и теплые зимы составляет 1,5—3 мес.

Процесс развития ледяного покрова на Каспии продолжается с момента начала ледообразования до наибольшего распространения льда по площади и достижения им максимальных вертикальных размеров.

Промежуток времени между датами первого появления льда и полного замерзания назван «периодом становления льда». Характер развития ледовых процессов в этот период и его продолжительность зависят от гидрометеорологических условий предзимья. 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, сохраняющийся больше месяца, образуется в среднем через одну-две недели после начала ледообразования. В холодные предзимья при активных воздействиях АВМ на акваторию моря, обуславливающих сильные и устойчивые морозы, промежуток времени между началом ледообразования и полным замерзанием сокращается до 2—3 дней.

В экстремально холодные предзимья с сильными и продолжительными морозами вдоль побережья сразу устанавливается устойчивый ледяной покров. Последующие похолодания приводят к укреплению ледяного

покрова, формированию у побережья устойчивого припая и полному замерзанию в аномально ранние сроки.

Исключительно интенсивное развитие ледовых процессов на мелководье Северного Каспия протекало в экстремально холодное предзимье. Процесс ледообразования начался в конце октября. В первой половине ноября неподвижным льдом было покрыто все мелководное побережье Северного Каспия. К третьей декаде ноября отмечалось полное замерзание акваторий с глубинами до 3—5 м.

В теплые предзимья при чередовании волн холода и тепла охлаждение водных масс протекает менее активно. Сроки начала ледообразования даже у мелководного северо-восточного побережья сдвигаются на конец ноября. На остальных акваториях Северного Каспия первый в сезоне лед образуется лишь в декабре. Смена периодов с чистой водой и льдом происходит до полного замерзания от 5 до 10 раз. Устойчивый припай формируется только в январе. При последующих похолоданиях наступает полное замерзание.

Ранние и поздние сроки полного и окончательного замерзания в Северном Каспии в различные по термическим условиям предзимья отмечаются в широком диапазоне — от второй половины октября до второй половины января.

В экстремально теплые предзимья начало ледообразования у побережья Северного Каспия может задерживаться до первой половины января. В такие годы в открытых районах моря с глубинами более 3—5 м наблюдается лишь неустойчивый лед, вынесенный с мелководья.

В зимы с неустойчивым ледяным покровом период укрепления и становления льда уведачивается до 1.5—2 месяцев. К югу от параллели 44° с.ш. в теплые зимы понятие «становление льда» теряет смысл, так как на всей прибрежной акватории преобладает лишь плавучий лед.

Своеобразно протекает процесс ледообразования в открытых районах Северного Каспия с общей направленностью от мелководного побережья к сравнительно глубоководным центральным районам Северного Каспия.

В умеренные зимы в октябре неподвижный лед устанавливается лишь узкой полосой. В суровые зимы граница льда распространяется до изобаты 1-2 м. В ноябре граница льда проходит либо в незначительном удалении от побережья (умеренные зимы) либо до 2-метровой изобаты (в суровые зимы).

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.

Устойчивое замерзание на северо-восточном мелководье обычно отмечается не позже, чем через 5-10 дней после первого замерзания. В теплые зимы разрыв в сроках замерзания увеличивается до 15-20 дней и более. Оно наступает во второй половине декабря или даже в начале января. В экстремально теплые зимы устойчивого замерзания акватории Северного Каспия не наблюдается.

В декабре в умеренные зимы граница припая близка к положению изобаты 3 м. Общая граница льда несколько сдвинута мористее за счет зоны плавучего льда, образующегося при взломе припая. В суровые зимы граница припая подходит до глубин 7-10 м. Зона плавучего льда располагается значительно мористее. В теплые предзимья молодой лед образуется лишь вблизи северо-восточного побережья.

В январе-феврале кромки припая и плавучего льда занимают наиболее южное положение. В умеренные зимы южная граница припая подходит к свалу глубин (10—15 м). Здесь процесс ледообразования замедляется за счет

внутриводного теплообмена и адвекции теплых вод из восточных районов Среднего Каспия. В холодные и экстремально холодные зимы перемещение границы неподвижного льда к югу от позиции максимального распространения на глубинах 10-15 м и более происходит за счет скрепления плавучего льда и вновь образующегося и быстро укрепляющегося молодика. В теплые зимы граница припая проходит вдоль 3 метровой изобаты, а плавучий лед распространяется к югу до глубины 5 м.

3.2 Очищение ото льда на Каспийском море

Сроки начала и интенсивность ослабления и разрушения льда обуславливаются общей ледовитостью моря – мощностью образовавшегося льда и особенностями гидрологических условий к началу ослабления в процессе таяния и разрушения льда. Совокупность воздействия перечисленных факторов обуславливает неоднородность процессов разрушения льда в различных районах моря и большую их многолетнюю изменчивость. Ослабление структуры льда (и ледяного покрова в целом) обуславливается радиационным балансом на поверхности льда и процессами контактного теплообмена льда с более теплой подстилающей водной массой. Процесс разрушения льда весной активизируется под влиянием динамических факторов - тангенциального давления ветра на поверхность льда, изменения уровня моря и волнения в открытых районах моря, где активизируется теплообмен с более теплыми водными массами. Первая подвижка (взлом) припая в умеренные зимы начинается в январе с бухт и заливов Среднего Каспия. В Северном Каспии взлом припая к югу от 45° с. ш. также наблюдается в январе, у северного побережья моря он протекает с середины февраля до середины марта.

В зимы с неустойчивыми морозами и слабым ледяным покровом под действием ветра, волнения и нагонной волны происходят взлом и разрушение неокрепшего припая даже в ноябре. В последующую часть ледового сезона при очередных мощных вторжениях холодных АВМ на акваторию Северного

Каспия припай может вновь устанавливаться за счет смерзания ледяных полей, находящихся в сжатом состоянии или скрепления их вновь образующимся молодым льдом. В такие годы даже у северного побережья моря за зиму наблюдается от двух до четырех случаев взлома припая. К югу от 45° с. ш. бывает 6-10 случаев взлома припая за зиму.

В восточной части Среднего Каспия в суровые зимы взлом припая задерживается до второй половины января у открытых берегов и до начала марта в закрытых бухтах и заливах.

У западного побережья Среднего Каспия образовавшийся в прибрежной зоне припай или смерзшиеся ледяные поля взламываются в середине февраля.

Окончательное разрушение припая в умеренные зимы к северу от 45° с. ш. происходит в основном во второй половине марта. Южнее 45° с. ш. оно осуществляется с середины февраля до середины марта.

В теплые зимы припай окончательно разрушается примерно на 15-30 дней раньше средних сроков - с конца февраля до середины марта. В экстремально холодные зимы разрушающийся припай сохраняется в основном до конца марта — середины апреля или несколько позже.

В аномально теплые предзимья при смене морозов устойчивыми оттепелями происходит интенсивное термическое разрушение неокрепшего молодого льда, усиливаемое воздействием ветра. Под влиянием термодинамических факторов в начале ледового сезона очищаются ото льда не только мористые, но и прибрежные мелководные районы Северного Каспия. Первое очищение ото льда часто происходит при интенсивных оттепелях после начала ледообразования в октябре или в начале ноября.

Открытые побережья, бухты и заливы Среднего и Южного Каспия при резких и устойчивых оттепелях также могут очищаться ото льда в ноябре-декабре.

В холодные зимы первое очищение ото льда задерживается до февраля-марта на Среднем Каспии и до конца марта - начала апреля в северной части моря.

Окончательное очищение ото льда в умеренные зимы начинается в конце января - начале февраля с юго-восточного побережья моря, последовательно распространяясь к северу. В феврале ото льда очищаются бухты и заливы восточного побережья Среднего Каспия, в начале марта - все западное побережье средней части моря. В Северном Каспии процесс очищения ото льда протекает в марте. В начале апреля ото льда очищается северо-восточное побережье моря.

В теплые зимы к концу января бухты и заливы Среднего Каспия окончательно очищаются ото льда. Акватория Северного Каспия к югу от 45° с. ш. полностью освобождается ото льда в середине февраля. К северу от 45° с. ш. очищение ото льда завершается в середине марта.

В холодные зимы процесс окончательного очищения ото льда у восточного побережья Среднего Каспия задерживается до конца марта - начала апреля. Западное побережье Среднего Каспия в годы мощных выносов «тяжелого» плавучего льда из Северного Каспия полностью очищается ото льда лишь во второй декаде апреля.

В аномально холодные зимы акватория Северного Каспия последовательно освобождается ото льда в течение апреля. В первой половине апреля ото льда очищаются прибрежные районы к югу от 45° с. ш. У северного побережья Каспия ледяной покров сохраняется до третьей декады апреля (Пешной — 20 апреля 1949 г.). (Под ред. Терзиева Ф.С., 1992)

4. Используемые материалы

4.1 Район исследования

Районом исследования является северная часть Каспийского моря. Координаты данного участка от 40 ° до 50 ° северной широты и от 45 ° до 56 °

восточной долготы. Данные наблюдений для верификации данных получены с метеорологической станции Пешной (Атырауская область, Казахстан), расположенной на побережье северной части Каспийского моря. Координаты станции: 51.68° восточной долготы и 46.92° северной широты, высота над уровнем моря -21 м.

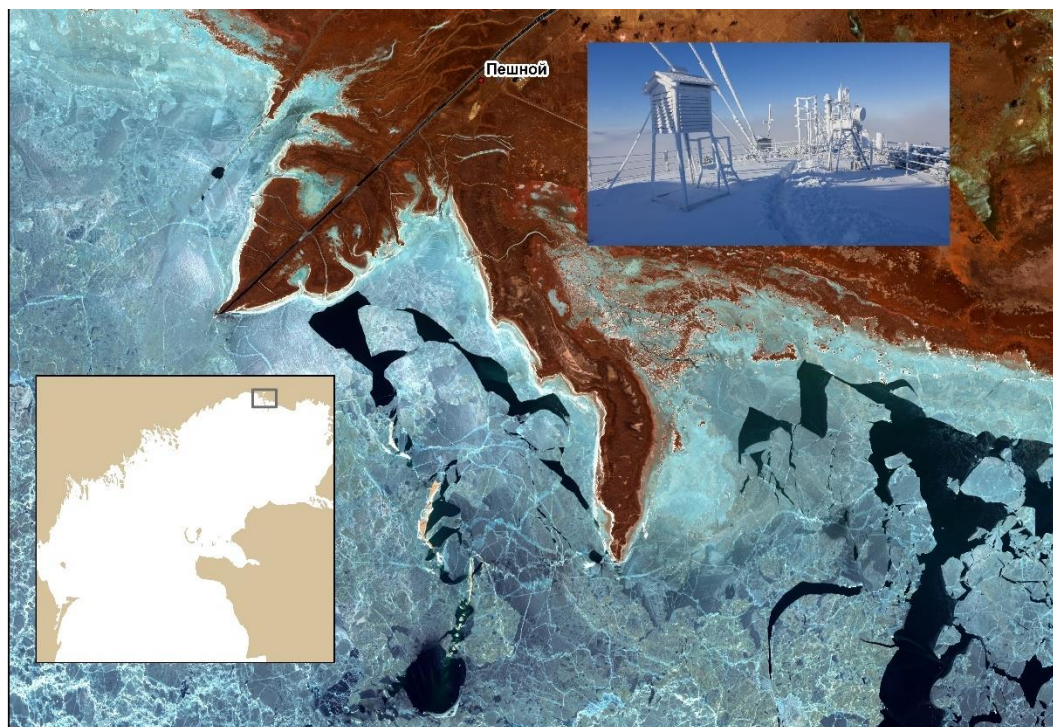


Рисунок 4.1.1: Расположение станции Пешной

4.2 Программное обеспечение и базы данных

Программа долгосрочного прогноза погоды «Синоптик долгосрочник» разработана и функционирует в программной среде IDL 8.1.

Программа предназначена для разработки долгосрочных прогнозов погоды на месяц и сезон синоптическими методами и для визуализации и интерпретации численных прогнозов погоды, разработанных по модели CFSv2 NCEP/NCAR на месяц и сезон.

При помощи данного инструмента возможно разрабатывать прикладные прогнозы замерзания водоемов на сроки до одного сезона, с использованием данных реанализов и расчетов модели.

4.3 Базы данных

Программа «СИНОПТИК ДОЛГОСРОЧНИК» использует данные, полученные из 10 различных прогностических центров и научных проектов, которые поддерживаются оперативно:

1. Проект «NCEP/NCAR Reanalysis 1», поддерживаемый в NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA;
2. Проект «Twentieth Century Reanalysis Project», поддерживаемый в U.S. Department of Energy, Office of Science Innovative and Novel Computational Impact on Theory and Experiment (DOE INCITE) program, and Office of Biological and Environmental Research (BER), and by the National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Program Office.";

Базы данных, используемые программой, содержат 19 гидрометеорологических параметров, а именно:

- 1) Приземное атмосферное давление (в гектопаскалях);
- 2) Температура воздуха на высоте 2 метра (в градусах Цельсия);
- 3) Температура поверхности моря (в градусах Цельсия);
- 4) Количество осадков (в кг/м²) по данным реанализа;
- 5) Высота снежного покрова (в метрах);
- 6) Сплоченность льда (в процентах);
- 7) Высота поверхности 1000, 850, 700, 500, 300, 100 гпа (в декаметрах);
- 8) Температура воздуха на поверхностях 1000 и 850 гпа (в градусах Цельсия);
- 9) Составляющие U и V скорости ветра на высоте 10 метров (в м/с).

Значения аномалий для этих параметров рассчитываются как разность между значением гидрометеорологического параметра и его нормой в каждом узле регулярной сетки данных.

Отдельными процедурами в программе рассчитываются 10 типов индексов циркуляции:

- 1) Среднемесячные индексы Северо-Атлантического рассчитанные

по классической схеме колебания;

- 2) Среднемесячные индексы Тихоокеанского колебания;
- 3) Среднемесячные индексы Южного колебания;
- 4) Среднемесячные индексы Арктического колебания;
- 5) Среднесуточные, среднемесячные и среднегодовые индексы циркуляции Каца для выбранного района Земного шара;
- 6) Среднемесячные и среднесуточные индексы Восточно-Атлантического колебания;
- 7) Среднемесячные и среднесуточные индексы Западно-Атлантического колебания;
- 8) Среднемесячные и среднесуточные индексы Тихоокеанско-Североамериканского колебания;
- 9) Среднемесячные и среднесуточные индексы Западно-Тихоокеанского колебания;
- 10) Среднемесячные и среднесуточные индексы Евразийского колебания;

Для визуализации и интерпретации ансамблевого прогноза на 3 месяца вперед, используются данные 40 членов ансамбля модели CFS v2, выпускаемой в NCEP/NCAR:

- 1) Приземное атмосферное давление (в гектопаскалях);
- 2) Температура воздуха на высоте 2 метра (в градусах Цельсия);
- 3) Количество осадков (в кг/м²);
- 4) Высота поверхности 500 гпа (в декаметрах);
- 5) Температура воздуха на поверхности 850 гпа (в градусах Цельсия);

5. Анализ и результаты исследования

5.1 Используемые данные и методика исследования

Наблюдения за состоянием атмосферы и льдом в море производятся с береговых гидрометеорологических станций и постов, а также могут производиться с самолетов, вертолетов, попутных и экспедиционных судов и ледоколов и искусственных спутников земли (ИСЗ). Эти данные используются как для разработки методов прогноза и их проверки, так и в качестве оперативной информации, применяющейся для гидрометеорологического обеспечения морской деятельности. Недостатком наблюдений является их нерегулярность и неравномерность во времени и пространстве. Так же доступ к данным обычно ограничен для неуполномоченных пользователей.

В данной работе использовались данные, имеющиеся в открытом доступе в сети интернет.

Даты ледообразования и ледоразрушения прежде всего определяются тепловыми и динамическими факторами атмосферы. В качестве исходной информации в данной работе были выбраны временные ряды среднесуточных температур воздуха и параметры ветра с метеорологической станции Пешной за период с октября по март за последние 20 лет (2000 до 2021 г.г.). Архивы этих данных имеются в свободном доступе в сети интернет. (<http://www.pogodaiklimat.ru/>)

Нужно отметить, что на ледообразование и процессы его развития влияет сумма отрицательных температур воздуха, накопленная от дня перехода температур воздуха через ноль градусов до дня, на который прогнозируется определенная ледовая характеристика, такая, например, как дата появления льда или толщина льда. Эту величину принято называть суммой градусодней мороза (СГДМ) или суммой морозодней. На основе данных наблюдений среднесуточных температур воздуха за имеющийся период (2000-2021 г.г.) были рассчитаны суммы накопленных градусодней мороза и сделана оценка суровости зим. (Рисунок 5.1.1, Таблица 2)



Рисунок 5.1.1: Рассчитанные суммы градусодней мороза за период 2000-2021 г.г.

Год	Морозодни	Типизация зим
2000-2001	333	Мягкая
2001-2002	265	Мягкая
2002-2003	790	Суровая
2003-2004	236	Мягкая
2004-2005	499	Умеренная
2005-2006	735	Суровая
2006-2007	307	Мягкая
2007-2008	893	Суровая
2008-2009	587	Умеренная
2009-2010	648	Умеренная
2010-2011	651	Умеренная
2011-2012	1009	Очень суровая
2012-2013	566	Умеренная
2013-2014	516	Умеренная
2014-2015	661	Умеренная
2015-2016	226	Мягкая
2016-2017	291	Мягкая
2017-2018	677	Умеренная
2018-2019	439	Умеренная
2019-2020	265	Мягкая
2020-2021	691	Умеренная

Таблица 2: Типизация зим за период 2000-2021 г.г.

Для определения дат появления льда использовались преимущественно визуальная интерпретация данных космических снимков с оптических (MODIS, Landsat, и Sentinel-2) и радарных сенсоров (Sentinel-1) имеющихся в свободном доступе на сайтах NASA, USGS и COPERNICUS

(<https://worldview.earthdata.nasa.gov/> , <https://earthexplorer.usgs.gov/>, <https://scihub.copernicus.eu/>).

С помощью спутниковых данных в открытом доступе стало возможным как оперативно определять появление льда, так и наблюдать ледовую обстановку в около реальном времени. Особенно важно использование методов дистанционного зондирования имеют для акваторий, где использование традиционных контактных измерений затруднено, а в ряде случаев и невозможно. Основными методами ДЗЗ, используемыми для этих задач, являются радиолокационная съемка (радар бокового обзора с синтезированной апертурой, РСА или SAR) и спектрорадиометрическая съемка (например, данные сенсоров MODIS с ИСЗ TERRA и AQUA). Недостатком этих данных можно назвать нерегулярность съемки и ограниченность покрытия. Также, данные спектрорадиометрической съемки зависят от облачности что может мешать регулярным оперативным наблюдениям с использованием спутниковых снимков.

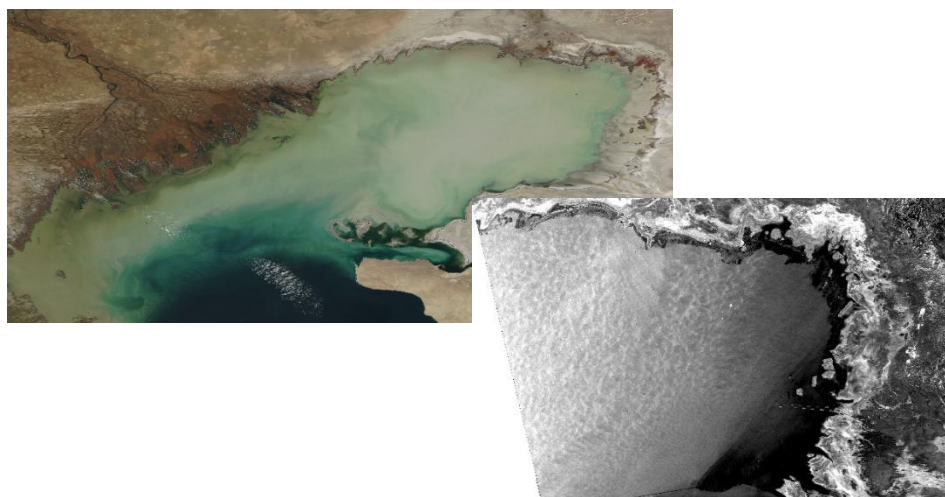


Рисунок 5.1.2: Примеры спутниковых снимков для мониторинга льда на Каспийском море. (MODIS (оптический) и Sentinel-1 (радарный))

Для составления долгосрочных прогнозов были использованы данные реанализа, полученные из существующего инструментария системы «синоптик-долгосрочник».

Данные реанализа представляются на регулярной координтаной сетке, где нет пропущенных данных. В данной работе использовались данные реанализа,

разрабатываемых по модели GFS с шагом сетки 1 градус. Отмечено что значениями данных реанализа следует пользоваться с осторожностью, так как они представляют собой оценки реальных данных на основе неравномерно распределенных данных наблюдений, соответственно имеют погрешности.

Так, оценка дат появления льда по результатам прогнозов по модели CFSv.2 в системе «Синоптик-Долгосрочник» для Каспийского моря показал результат, различающийся с данными наблюдений в среднем от 7 до 27 дней за период 2000-2021.

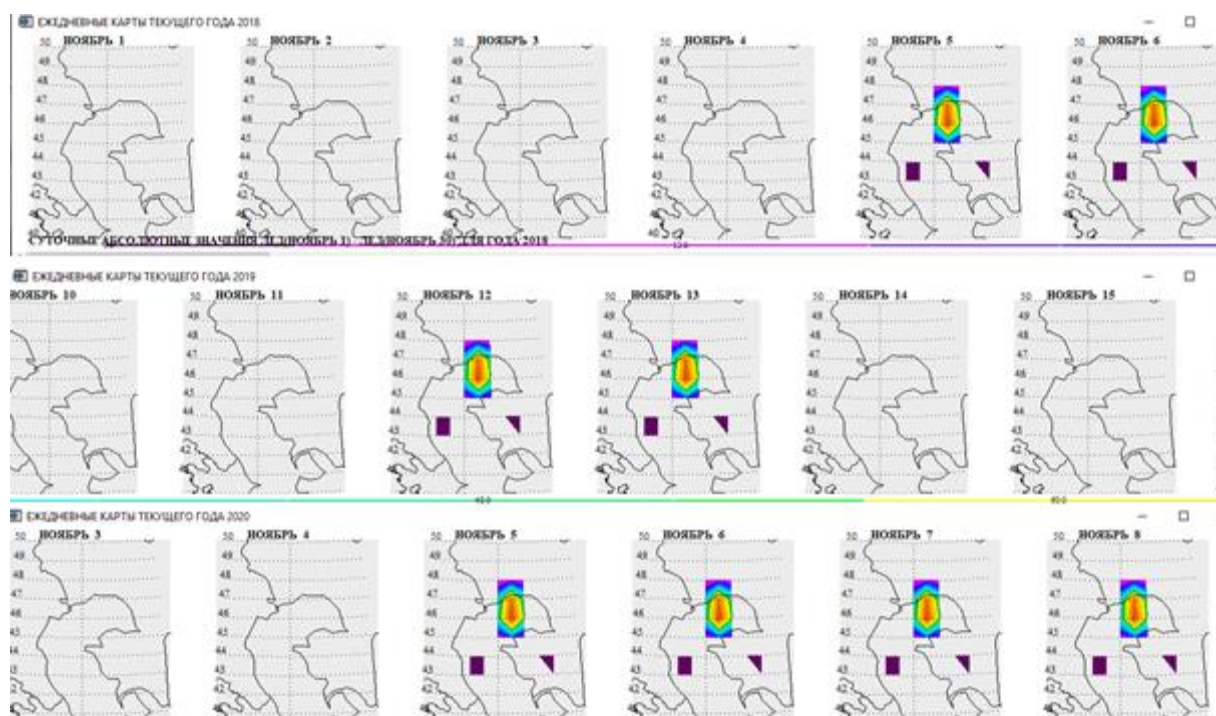


Рисунок 5.1.3: Пример «карт-почтовых марок» для первого появления льда за 2018-2020 г.г.

Тем не менее, при анализе среднемесячных данных температур воздуха по данным реанализа и данным наблюдений на высоте 2 метра, данные реанализа оказались близкими к данным наблюдений в большинстве случаев.

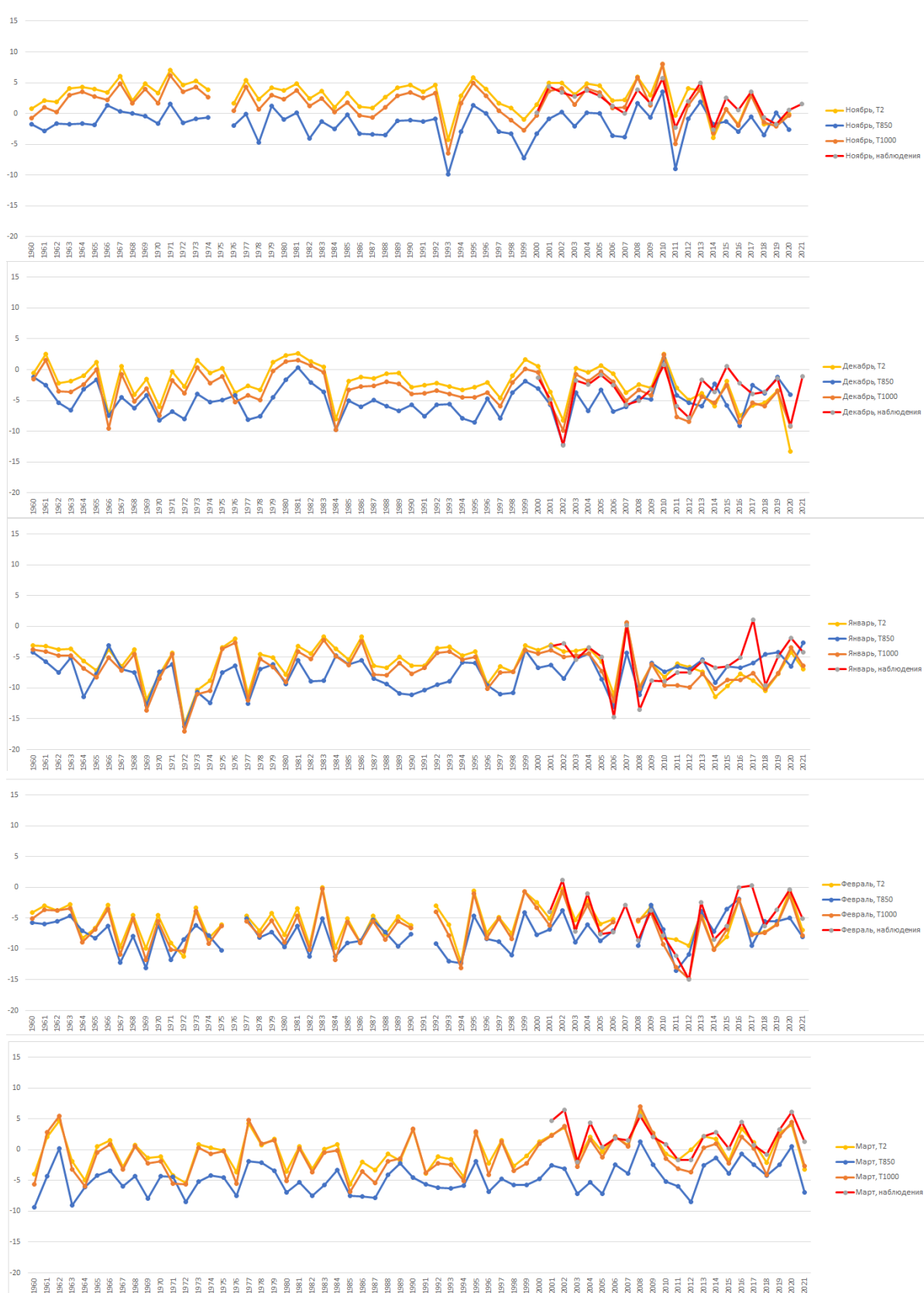


Рисунок 5.1.4: Проверка среднемесячных данных температур воздуха по данным реанализа и наблюдений.

В настоящей работе предпринята попытка разработки долгосрочного прогноза появления льда на северо-востоке Каспия используя статистические методы и методы ансамблевого прогнозирования.

Нами были использованы данные по среднесуточной температуре воздуха в период с октября по март за последние 20 лет (2000-2021) со станции Пешной, данные наблюдений первого появления льда и даты наблюдений устойчивого появления льда за период 2015-2021 по космическим снимкам.

Все материалы взяты с открытых источников (интернет).

Статистический анализ полученных данных установил, что между датами появления льда и датами устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C и -5°C существует тесная связь. Так корреляционная связь между датами первого появления льда и датами достижения температуры значений 0°C и -5°C составили 0.99 и 0.95 соответственно. Корреляция дат появления льда с суммами градусов морозодней рассчитанных по данным реанализа составила 0.96 и 0.72.

Было установлено так же, что по данным наблюдений за период 2000-2021 год самая ранняя дата первого появления льда была 07 ноября 2011 г., а самая поздняя 18 декабря 2015года. Средняя дата первого появления льда за 20-летний период - 27 ноября.

Нами были вычислены суммы ежедневных градусодней мороза по данным наблюдений для каждого года в отдельности для всего периода. Средняя сумма накопленных градусов морозодней необходимых для первого появления льда по данным наблюдений составила -15°C , а для устойчивого появления льда -35°C .

По данным реанализа нами были построены графики сумм накопленных морозодней и определены суммы морозодней для дат первого появления льда. Средние суммы градусов морозодней рассчитанные по реанализу, для дат

первого появления льда составили примерно -5°C -7°C , а для устойчивого появления льда составили примерно -30°C -45°C . Корреляция между датами первого появления льда, рассчитанными по средним суммам градусов морозодней по реанализу и датами, полученными из ряда наблюдений, составила 0.86 (за период 2000-2021). Корреляция между датами устойчивого появления льда, рассчитанными по средним суммам градусов морозодней по реанализу и датами, полученными из ряда наблюдений, составила 0.94 (период расчета 2015-2021). По следующим зимам разница между датами первого появления льда по наблюдениям и реанализу составила наибольшую разницу - 2003-2004 -11 дней; 2005-2006 -20 дней; 2015-2016 -19 дней. Разница в датах установления льда за остальные зимы периода 2000-2021 составила от 1 до 5 дней.

В годах с наибольшими расхождениями в датах появления первого льда между данными реанализа и данными наблюдений, было отмечено следующее:

По суровости зим года 2015-2016 и 2003-2004 были самыми теплыми за последние 20 лет. За 2015-2016 год - 226 морозодней, 2003-2004 – 236 морозодней, что ниже среднего (537 морозодней).

За 2005-2006:

2005-2006 зима была суровой, с количеством морозодней 735, что выше среднего (537 морозодней), и четвертой холодной зимой за последние 20 лет. (Рисунок 5.1.5)



Рисунок 5.1.5: Ранжированное количество сумм градусов морозодней (слева на право от минимальных до максимальных)

Разница в накоплении сумм градусов морозодней между данными наблюдений и реанализа составила 20 дней. Общая сумма накопленных сумм градусов морозодней составила 735 (умеренная зима), что выше средней суммы по морозодням за 20 лет – 537.

Появление первого льда произошло 8 декабря, что позднее чем средняя дата для первого появления льда за последние 20 лет (27 ноября) по данным наблюдений. По данным реанализа была рассчитана дата первого появления льда (5-7 сумм накопленных морозодней), которая пришлась на 28 декабря.

Ниже приведены космические снимки оптического сенсора MODIS, показывающие ледовую границу на 8 по 30 декабря. (

Рисунок 5.1.6, Рисунок 5.1.7, Рисунок 5.1.8)

По снимкам видно, что фактически период замерзания Каспия проходил неустойчиво. Первый лед появился 8 декабря на востоке, потом растаял и окончательно. Установление первого льда произошло в период 27-30 декабря.

По данным реанализа появление первого льда произошло 28 декабря, что по фактическим данным является датой устойчивого появления льда.

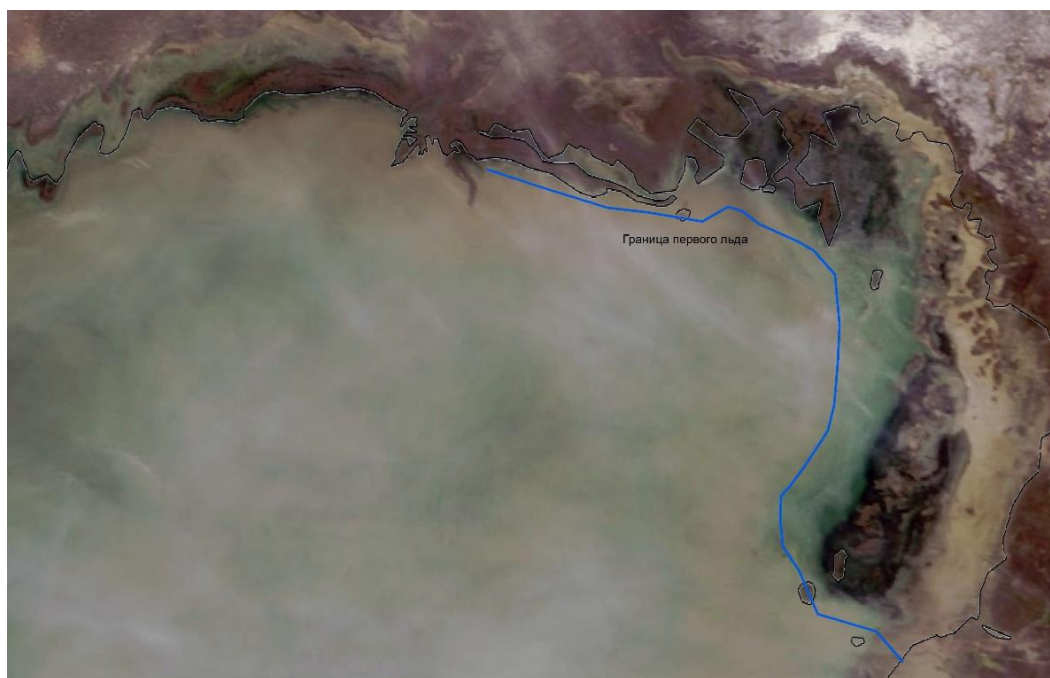


Рисунок 5.1.6 : MODIS 8-12-2005 – Появление первого льда

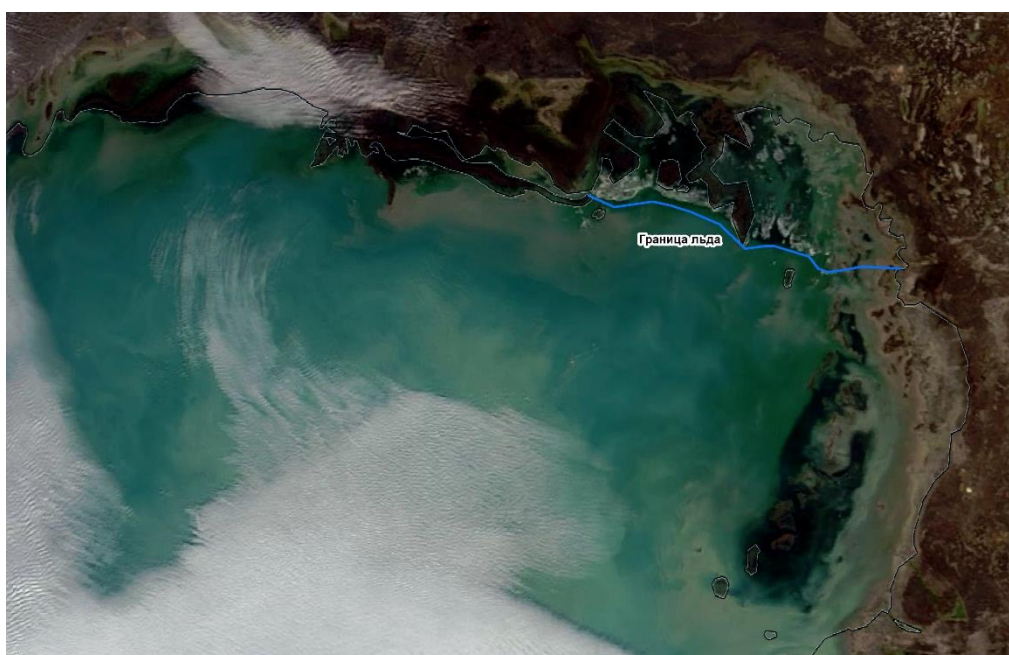


Рисунок 5.1.7: MODIS 19-12-2005 – Оставшийся лед в северной части Каспия



Рисунок 5.1.8 : MODIS 30-12-2005 – Начало ледостава

По анализу среднесуточных температур воздуха видно, что переход через 0°C произошел 5 декабря, а потом наблюдались слабоотрицательные среднесуточные значения, около 0°C -1°C в период с 5 по 13 декабря. В период с 14 по 22 декабря наблюдались слабоположительные температуры $1-3^{\circ}\text{C}$. После этого опять слабоположительные температуры наблюдались с 23 по 26 декабря. 27 декабря произошел резкий переход температур через -5°C и последующее понижение температуры.

Из графика ниже видно, что в период с 8- 27 декабря фактические температуры были выше на $1-5$ градусов, потом произошло их резкое понижение. Среднемесячные температуры по данным реанализа за декабрь в среднем выше среднесуточной нормы (2000-2022) на $3-8$ градусов.

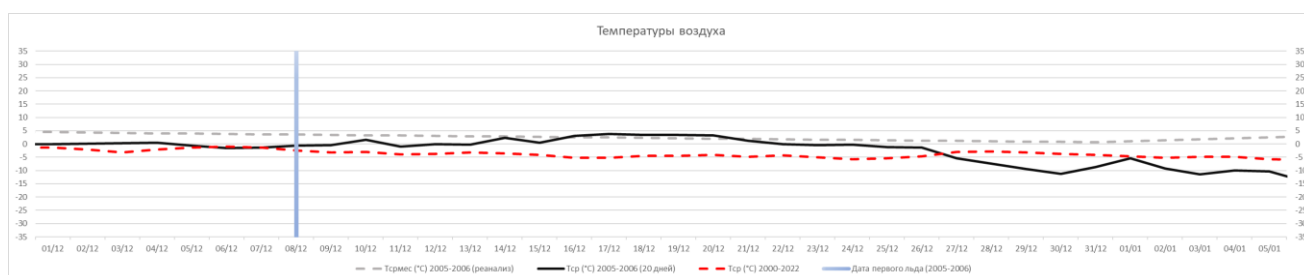


Рисунок 5.1.9: График температур за декабрь 2005г. Фактические, среднесуточная норма, рассчитанная за период 2000-2022 и данные среднемесячных данных реанализа (интерполированные).

В целом, декабрь был выше нормы по данным, соответственно устойчивое замерзание произошло позже. Так же можно отметить что несмотря на позднее замерзание по сравнению со средними датами, зима в



целом была холоднее нормы.

Рисунок 5.1.10: График температур за октябрь 2005 – март 2006г. Фактические, среднесуточная норма, рассчитанная за период 2000-2022 и данные среднемесячных данных реанализа (интерполированные).

В 2015-2016 годах разница между данными наблюдений и реанализа составила 19 дней. Сумма накопленных морозодней составила 226 (мягкая зима), что ниже средней суммы морозодней за 20 лет: 537. По количеству морозодней зима 2015-2016 была самой теплой и одной из самых коротких за последние 20 зимних периодов.

Появление первого льда по данным наблюдений произошло 18 декабря, что позднее чем средняя дата первого появления льда за последние 20 лет (28 ноября). По данным реанализа дата первого появления льда пришлась на 29 ноября, что раньше фактического появления льда на 19 дней, но является близкой к средней дате появления льда (28 ноября), рассчитанной за последние 20 лет наблюдений.

Ниже приведены космические снимки оптического сенсора MODIS, показывающие первое появление льда 19 декабря и отсутствие льда на снимке за 10 декабря.



Рисунок 5.1.11: MODIS 29-11-2015 – отсутствие льда

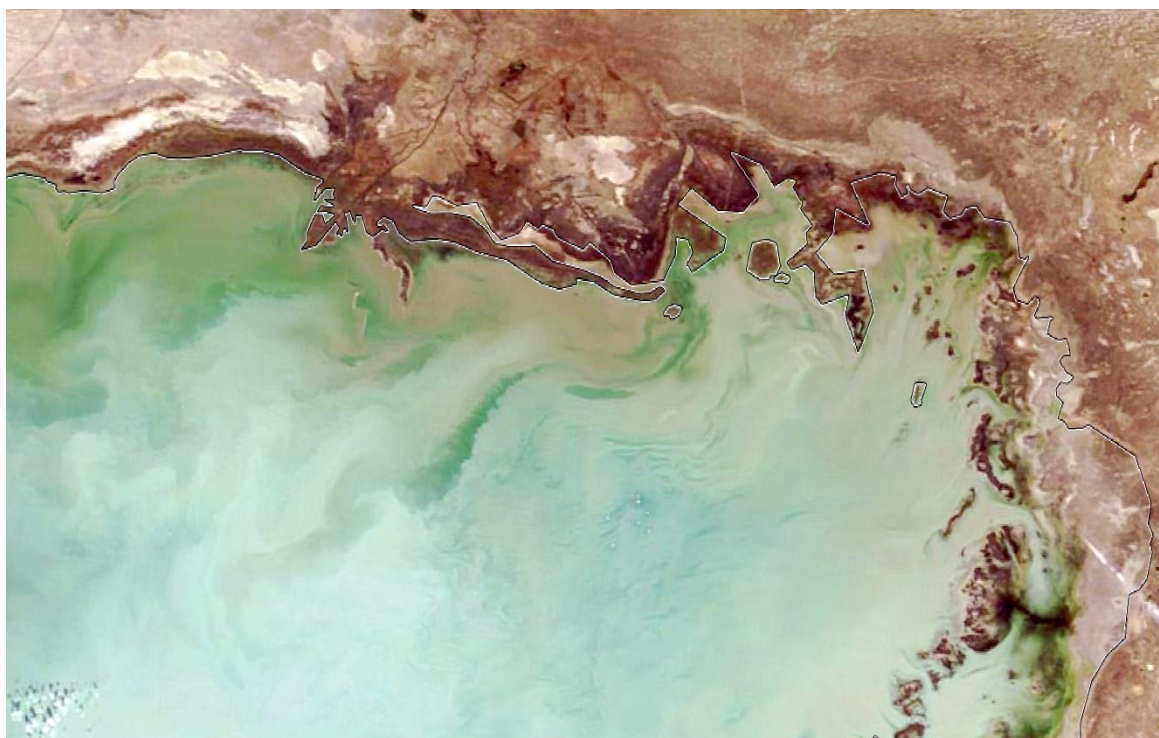


Рисунок 5.1.12: MODIS 10-12-2015 – отсутствие льда

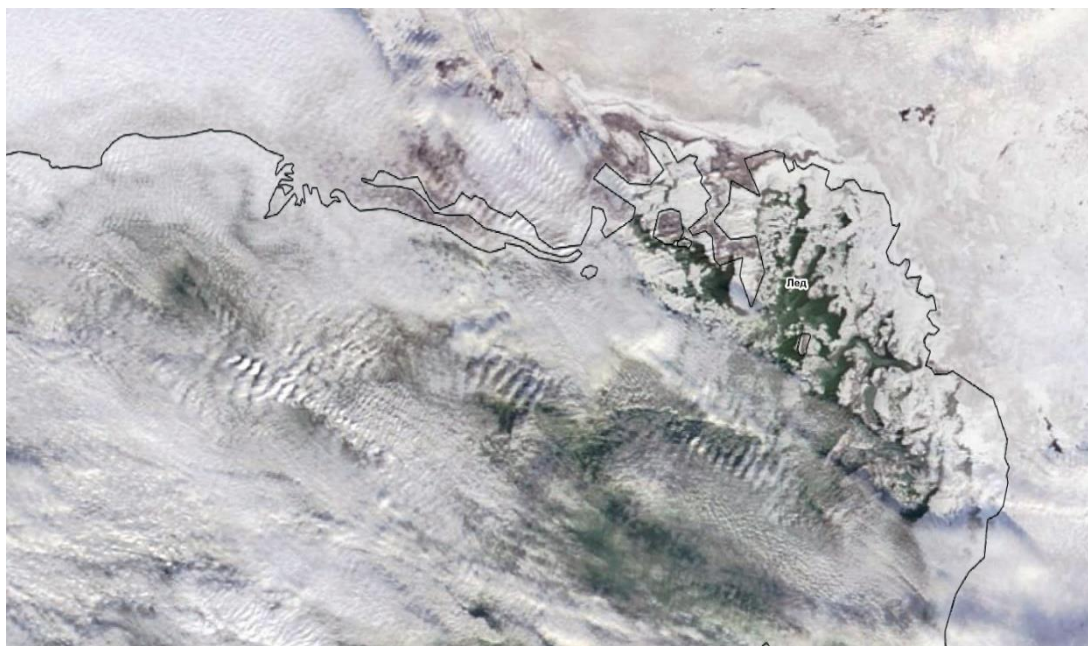


Рисунок 5.1.13: MODIS 19-12-2015 – появление льда

В соответствии с анализом среднесуточных температур воздуха по графику (Рисунок 5.1.14, Рисунок 5.1.15) видно, что переход через 0°C произошел 28-29 ноября, когда сумма градусов морозодней достигла почти -5°C . Далее среднесуточные температуры стали повышаться до -1°C и 1 декабря достигнув слабоположительных/слабоотрицательных значений от -1.2 до $+5.4$, которые продолжались в период с 1 по 17 декабря. 18 декабря наблюдалось резкое падение температуры до -6°C .

В целом, в конце ноября наблюдались температуры выше средних норм на $2-3^{\circ}\text{C}$ за исключением двух дней 28-29 ноября, когда температура была ниже нормы. Потом температура повысилась на $3-7^{\circ}\text{C}$ выше нормы до 17 декабря. К 18 декабря температура перешла -5°C и продержалась несколько дней.

Первый лед не появился 28-29 ноября при переходе температуры через 0°C из-за того, что вода не достигла точки замерзания, и вероятно была теплее нормы вследствие того, что в первой половине декабря температура воздуха была выше нормы. Так же есть вероятность, что появление льда произошло в камышовой и прибрежной зоне, невидимой на оптических снимках среднего

разрешения (MODIS), а затем лед быстро растаял при повышении температур и усилении ветра.

В целом, данные реанализа показывают хорошее соответствие с фактическим, краткосрочным падением температуры, который по данным наблюдений пришелся как раз на период 28-29 ноября и позволил сумме градусов морозодней достичь 9-14°C, что достаточно для первого появления льда. В оперативном прогнозе так же должна еще учитываться температура воды, чтобы скорректировать даты появления льда.

Среднемесячные температуры по данным реанализа за декабрь в среднем выше среднесуточной нормы (2000-2022) на 1-3°C. (Рисунок 5.1.14, Рисунок 5.1.15)

Рисунок 5.1.14: График температур за ноябрь- декабрь 2015г. Фактические, среднесуточная норма, рассчитанная за период 2000-2022 и данные среднемесячных данных реанализа (интерполированные).

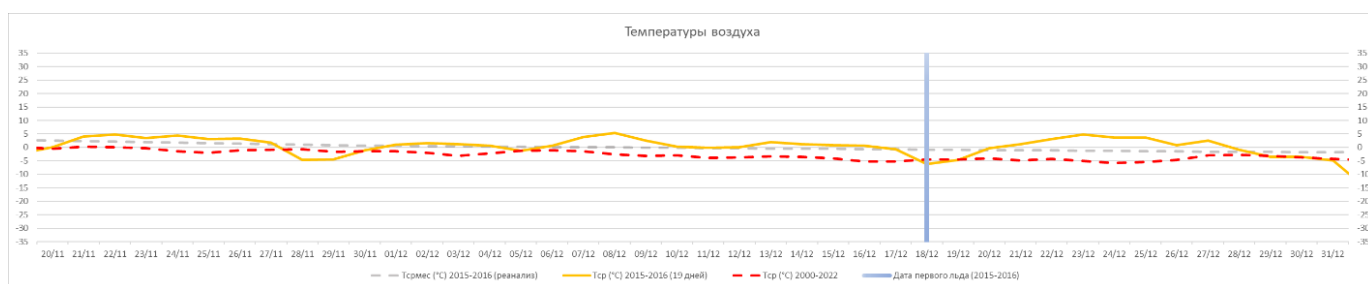


Рисунок 5.1.15: График температур за октябрь 2015 – март 2016г. Фактические, среднесуточная норма, рассчитанная за период 2000-2022 и данные среднемесячных данных реанализа (интерполированные).



За 2003-2004 разница в накоплении сумм градусов морозодней между данными наблюдений и реанализа составила 12 дней. Общая сумма накопленных морозодней за всю зиму составила 236 (мягкая зима), что ниже средней суммы по морозодням за 20 лет, которая составляет 537. По количеству морозодней эта зима является второй самой теплой за последние 20 зимних периодов.

Появление первого льда произошло 29 ноября, что близко к средней дате для первого появления льда за последние 20 лет (28 ноября) по данным наблюдений. По данным реанализа была рассчитана дата первого появления льда (5-7 морозодней), которая пришлась на 11 декабря. Если сравнивать эту рассчитанную дату и фактическое появление льда, то разница составляет 12 дней.

Ниже приведены космические снимки оптического сенсора MODIS, показывающие первое появление льда и ледовую обстановку по снимкам за 30 ноября (период фактического появления первого льда), а также 11 декабря и 12 декабря (период установления ледового покрова).

По снимкам видно, что в период с появления первого льда и до 11 декабря ледообразование происходило незначительно. Кромка льда растаяла в южной части и незначительно продвинулась к югу в северной и северо-западной части в результате дрейфа льда. После чего в период 11-12 декабря новый лед стал появляться в прикромочной зоне и граница льда стала постепенно распространяться на запад.



Рисунок 5.1.16: MODIS 30-11-2003 – появление льда

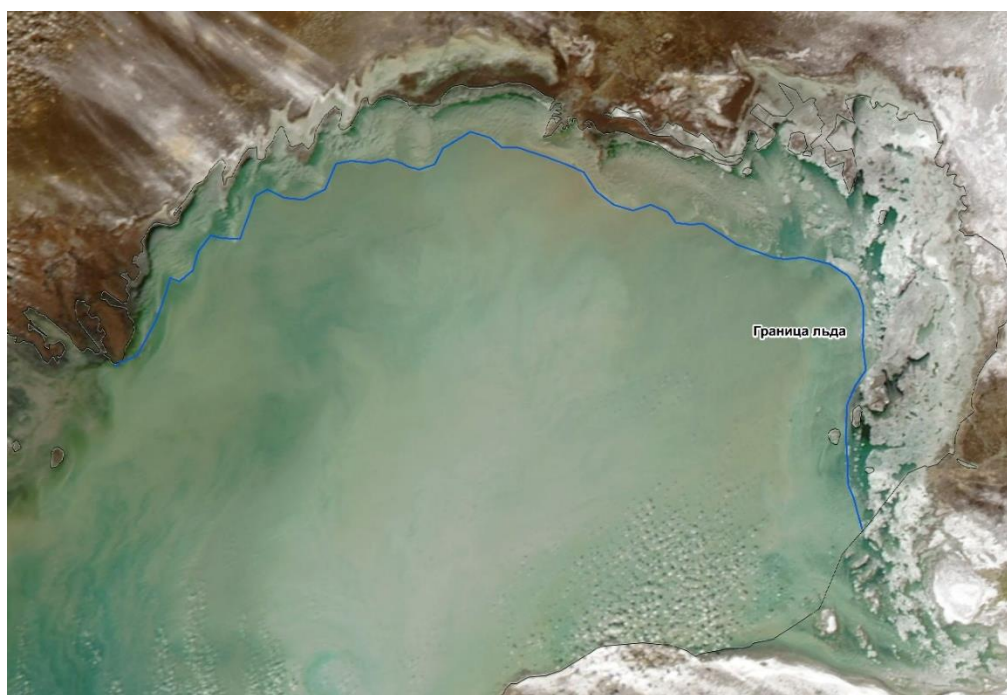


Рисунок 5.1.17: MODIS 11-12-2003 – Граница льда на месте

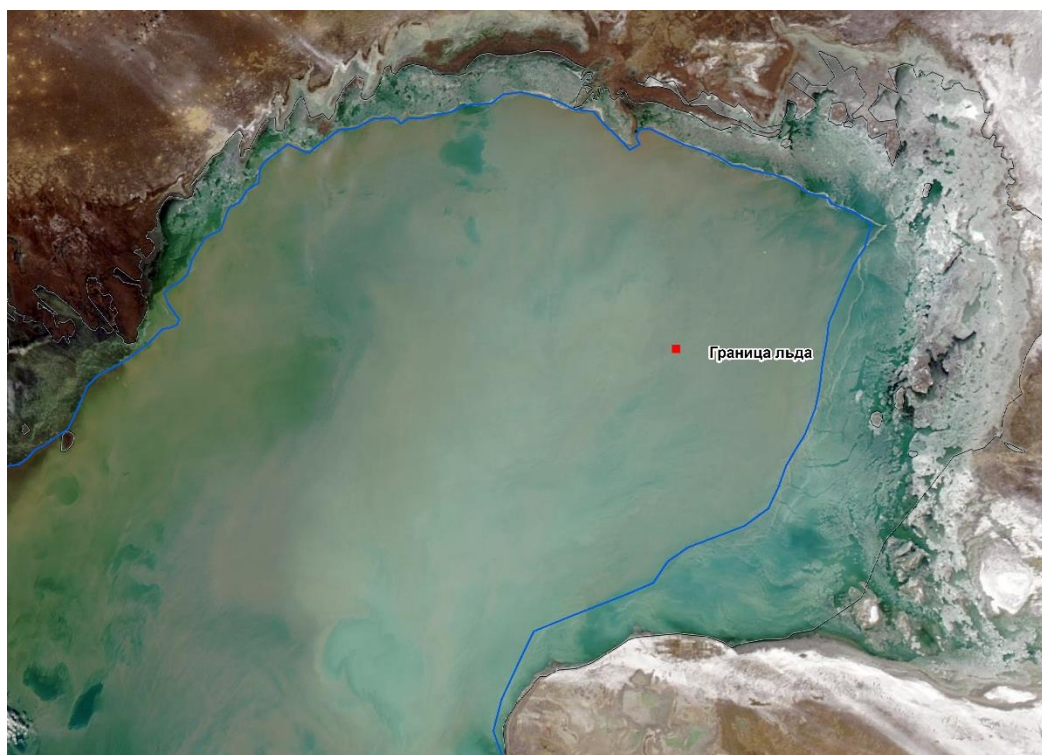


Рисунок 5.1.18: MODIS 12-12-2003 – Постепенное развитие льда

В соответствии с анализом среднесуточных температур воздуха по графику (Рисунок 5.1.19, Рисунок 5.1.20) видно, что переход через 0°C произошел 29 ноября, когда сумма градусов морозодней достигла почти -5°C . К 5 декабря сумма накопленных градусов морозодней достигла -21°C . В период с 6 по 10 декабря наблюдались слабоположительные температуры воздуха от $+0.7$ до $+2.5^{\circ}\text{C}$. В этот период образовавшийся лед не развивался. Начиная с 11 декабря температура воздуха стала понижаться, достигнув -28°C сумм накопленных градусодней мороза к 11 декабря, и -30°C к 13 декабря, что привело к дальнейшему развитию кромки льда.

В целом, в период с конца ноября до конца декабря в основном наблюдались температуры выше средних норм на $2-6^{\circ}\text{C}$ с краткосрочными периодами понижения до близких к норме. Периоды понижения температур совпадают с датами появления и развития ледового покрова.

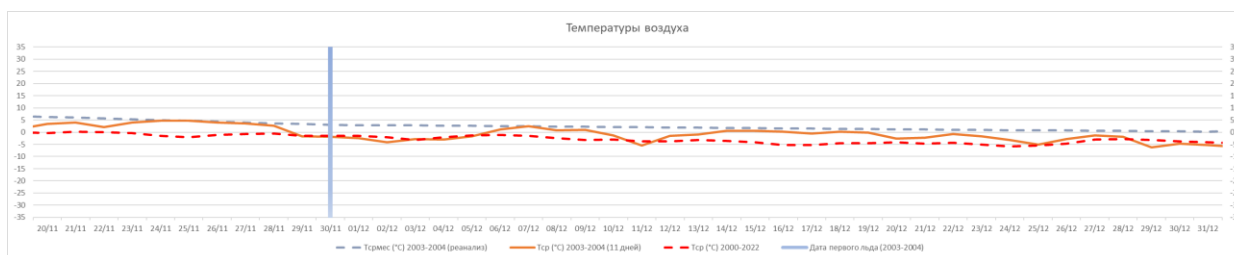


Рисунок 5.1.19: : График температур за ноябрь- декабрь 2003г. Фактические, среднесуточная норма, рассчитанная за период 2000-2022 и данные среднемесячных данных реанализа (интерполированные).



Рисунок 5.1.20: График температур за период октябрь 2003 – март 2004г. Фактические, среднесуточная норма, рассчитанная за период 2000-2022 и данные среднемесячных данных реанализа (интерполированные).

Первый лед появился 29 ноября при переходе температуры через 0°C. Рассчитанная дата появления первого льда по данным реанализа (12 декабря) показывает хорошее соответствие с фактическим падением температур, который, по данным наблюдений, пришелся на период 11-13 декабря.

Среднемесячные температуры по данным реанализа за ноябрь- декабрь в среднем выше среднесуточной нормы (2000-2022) примерно на 5°C.

Выводы:

- 2015-2016 - самый теплый зимний период за последние 20 лет. 2003-2004 – второй самый теплый зимний период за последние 20 лет. Температуры воздуха в среднем были выше средних за 20-летний период. В эти годы наблюдалось неустойчивое ледообразование, то есть первый лед разрушался и происходило повторное ледообразование.
- 2005-2006 – суровый зимний период (4-ый по суровости). Ледообразование проходило неустойчиво. Первый лед разрушился под

воздействием теплых температур, позже произошло повторное ледообразование.

- Если обобщить, то фактически в эти годы период замерзания Каспия проходил неустойчиво. После появления льда приходили волны тепла и происходило разрушение льда или уменьшение площади льда. Данные реанализа хорошо соответствуют датам, когда происходило устойчивое замерзание Каспия.

5.2 Ансамблевые прогнозы первого появления льда для зимних периодов 2020-2021 и 2021-2022 г.г.

С целью автоматизации процесса разработки прогнозов в вероятностных терминах, визуализации и анализа прогностической информации и оценки качества прогнозов, в данной работе использовалась специализированная информационно-вычислительная система «Синоптик-долгосрочник».

Для оценки возможности использования ансамблевых прогнозов, разрабатываемых по модели NCEP CFS v2, был проведен расчет сумм градусов морозодней по двум прогнозам – прогноз от 23 октября 2020 на октябрь-ноябрь 2020года и прогноз от 27 октября 2021 года на ноябрь-декабрь 2021 года. По данным каждого из членов прогностического ансамбля были построены индивидуальные графики накопления сумм морозодней и средний график по ансамблю. Предполагалось, что если на какую-то дату сумма градусов морозодней достигнет критической величины, необходимой для появления ледового покрова, то в эту дату установится ледовый покров на северо-востоке Каспия. На эту же дату строились карты вероятности установления ледового покрова. Для этих карт в каждом узле регулярной сетки данных рассчитывалось отношение количества членов ансамбля, для которых сумма морозодней достигла критической, к общему количеству членов ансамбля. Предполагалось, что это отношение показывает вероятность, с которой в данной точке сумма морозодней достигает

критической величины, а соответственно и вероятность, с которой может установиться ледовый покров. По полученным данным строились карты.

5.2.1 Прогноз первого появления льда на зимний период 2021-2022

В качестве догосрочного прогноза с использованием инструментов программного комплекса «Синоптик-долгосрочник» была взята модель CFS v.2, ежедневно рассчитываемая в NCEP/NCAR США и имеющаяся в свободном доступе с FTP сервера NCEP. Дата разработки прогноза 27 октября 2021 года. Прогноз составляется на Ноябрь-декабрь 2021 года. Для разработки прогноза использовалось 28 членов ансамбля.

Фактическое появление льда по данным наблюдений – 12 декабря. Устойчивое появление льда – 14 декабря (теплая зима, нет стабильного покрова до января)

Исходя из предшествующего анализа, в котором нами проводилось исследование соответствия данных температуры реанализа и дат появления льда, было установлено, что для появления первого льда в северо-восточной части Каспия необходимо, чтобы было накоплено в среднем 5°C - 7°C градусов морозодней. Наиболее вероятное появление устойчивого ледового покрова соответствует сумме 30°C - 45°C градусов морозодней. Период, для которого рассчитывалась сумма морозодней по данным ансамблевого прогноза установлен с 1 ноября по 20 декабря (20 декабря это самая поздняя дата появления льда по данным наблюдений за последние 20 лет).

Первое появление льда по среднему значению ансамбля:

Из графика прогностических сумм градусов морозодней (Рисунок 5.2.1.1) видно, что накопленные по среднему значению ансамбля суммы, достигают значения 5°C - 7°C в период с 7 по 10 декабря. Накопление градусов морозодней начинается с 26 ноября, так как до этого температуры воздуха были положительные. Накопление сумм с 26 ноября происходит медленно и достигает 1°C к 1 декабря. С 1 декабря по 6 декабря сумма достигает значений 5°C , а с 6 по 10 декабря 7°C . С 10 по 15 декабря сумма

накопленных градусов морозодней доходит до 11°C и далее, до 20 декабря (окончание рассматриваемого периода), держится на том же уровне (11°C). Таким образом, в соответствии со средним прогнозом по ансамблю наиболее вероятным периодом появления ледового покрова является 7-10 декабря.

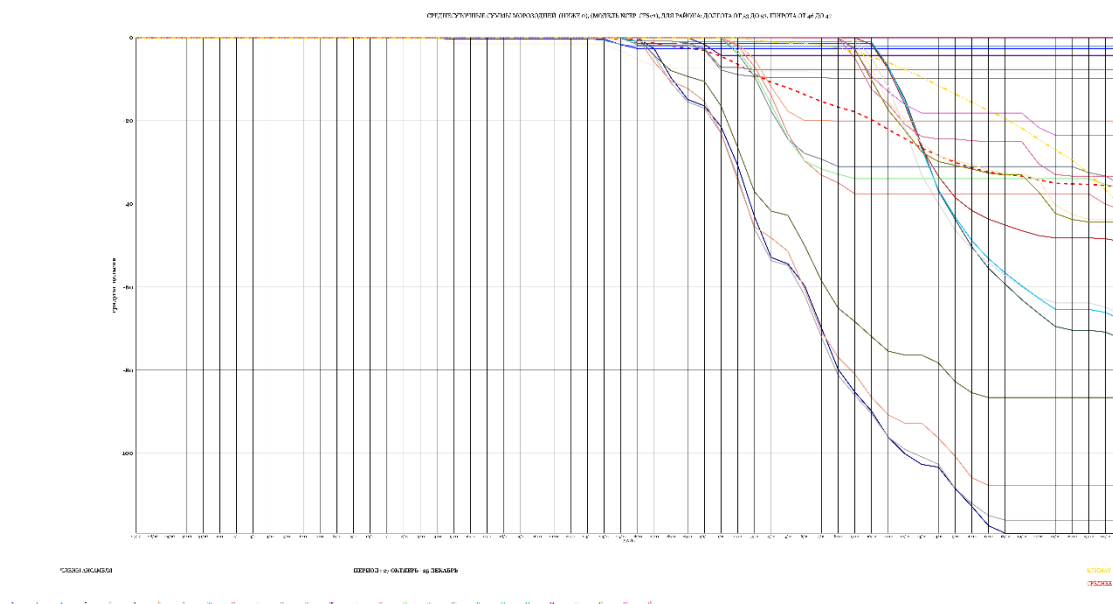


Рисунок 5.2.1.1: График ансамблей прогностических сумм градусодней мороза

Учитывая медленное накопления сумм градусов морозодней можно предположить, что в этот период наблюдаются оттепели, а соответственно вероятность появления льда снижается. Вторым вероятным периодом появления ледового покрова можно рассматривать 10-15 декабря, т.е. период, когда происходило постепенное накопление сумм градусов морозодней до 11 градусов.

Выявление наиболее подходящих прогностических членов ансамбля

Если рассмотреть фактические данные наблюдений зимы 2021 года мы обнаружим, что так же имел место неустойчивый переход от положительных температур к отрицательным. После 12 декабря зимний тип погоды установился, хотя по степени суровости зима характеризуется как мягкая.

Фактически, наиболее достоверными членами ансамбля, которые указывают на фактическую дату появления льда являются 10,13,11 и 6 члены. Эти члены ансамбля показывают начало накопления сумм градусодней мороза 10 декабря, которое к 11 декабря достигает -3°C , а затем достигает -5 -8°C к 12 декабря. К 13 декабря сумма накопленных градусодней мороза по этим членам ансамбля составляет -15°C -20°C .

В связи с тем, что в практике долгосрочного прогноза погоды отсутствует теоретическое обоснование выбора отдельных членов ансамбля из прогностической совокупности так как все члены ансамбля равновероятны, то разработать прогноз по этим членам ансамбля было невозможно, так как у нас не было оснований для их выбора.

Реальным решением проблемы ансамблевого прогноза в настоящее время является составление вероятностного прогноза замерзания льда. Для получения вероятностного прогноза, в каждом узле сетки выбранного района и на выбранную дату, рассчитывается процент, который составляют те члены ансамбля из 28, в которых сумма градусов морозодней достигла того значения, при котором на море появляется лед. Таким образом, суммы градусодней мороза рассчитываются для каждого члена ансамбля в отдельности для каждого узла сетки. Так же в каждом узле сетки отмечают процент тех членов ансамбля, суммы градусодней мороза в которых достигли на выбранную дату пороговой величины. По полученным данным строятся карты процента вероятности членов ансамбля, достигших на выбранную дату пороговой суммы.

Вероятность превышения прогностической суммы градусов морозодней на дату фактического установления первого ледового покрова.

Карта вероятности превышения прогностической суммы градусодней мороза показывает с какой вероятностью прогноз прогнозирует появление льда на определенную дату, учитывая, что сумма накопленных морозодней

составит -5°C , что по предварительным расчётам, сделанным ранее, достаточно для появления первого льда.

Карта вероятности превышения прогностической суммы градусов морозодней установленного предела (-5°C), после достижения которой на море появляется лед, показывает вероятность появления льда на определенную дату.

Вероятность установления первого ледового покрова 10 декабря, для прибрежных районов мелководной части Каспийского моря составила 80-100%. То есть из 28 членов ансамбля почти все показали, что сумма морозодней достигнет 5 градусов и появится лед. С вероятностью 40-60%, что составляет 17 членов ансамбля из 28, ансамблевый прогноз указывает, что лед распространится далее на северо-восток и северо-запад.

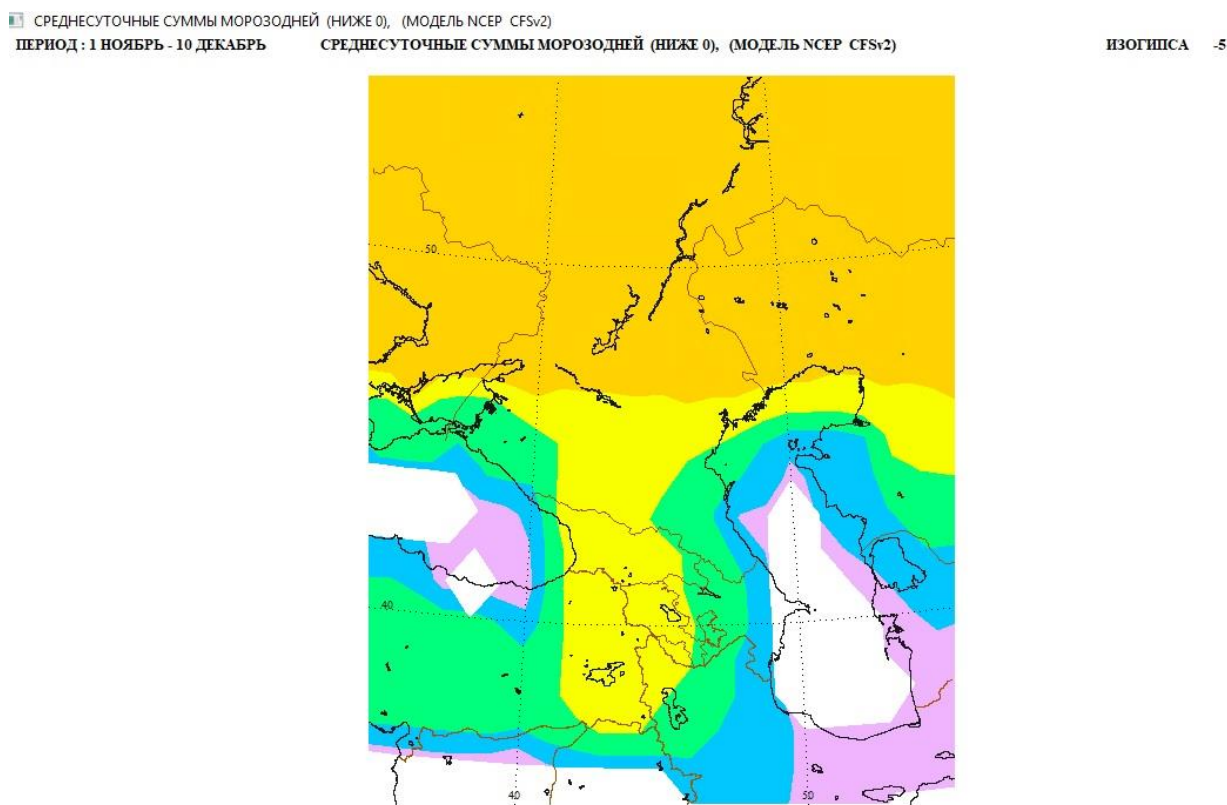


Рисунок 5.2.1.2: Карта превышения сумм градусодней мороза на 10 декабря

Вероятность установления первого ледового покрова 15 декабря, для северо-западной и северо-восточной районов мелководной части Каспийского

моря составила 80-100%. То есть из 28 членов ансамбля почти все показали, что сумма морозодней достигнет 5 градусов и появится лед.

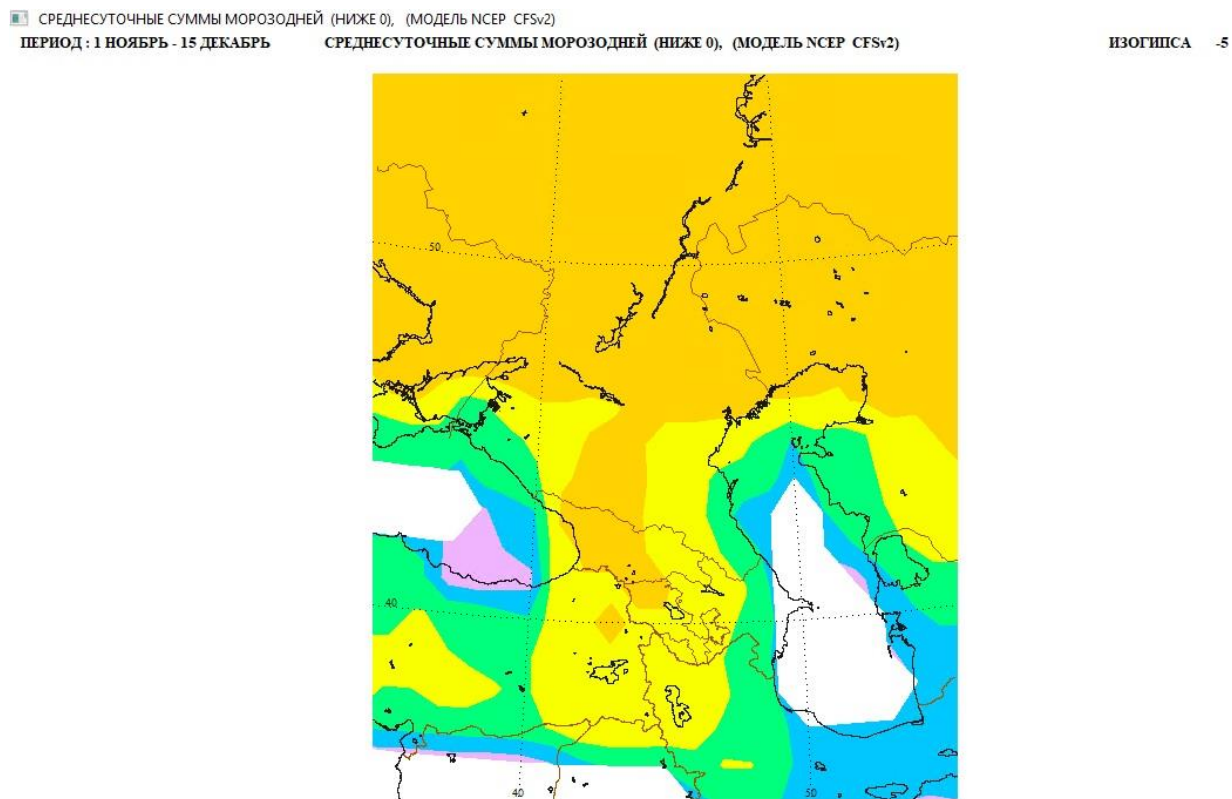


Рисунок 5.2.1.3: Карта превышения сумм градусодней мороза на 15 декабря

На 7 декабря (экспериментальная дата прогноза):

Вероятность установления первого ледового покрова 7 декабря для района северо-восточной и северо-западной части Каспийского моря составила 40-60%. То есть из 28 членов ансамбля 60% (≈ 17) членов ансамбля показала что сумма накопленных морозодней достигнет -5 и появится лед.

С вероятностью от 20-40% появление первого льда прогнозируется в центральной части Каспия. С наименьшей вероятностью (0-20 %) появление первого льда ожидается в южной части моря.

Вероятность появления льда является вспомогательной прогностической информацией, помогающей в планировании. Например, для

морских работ эта информация важна при планировании демобилизацию судов не ледового класса.

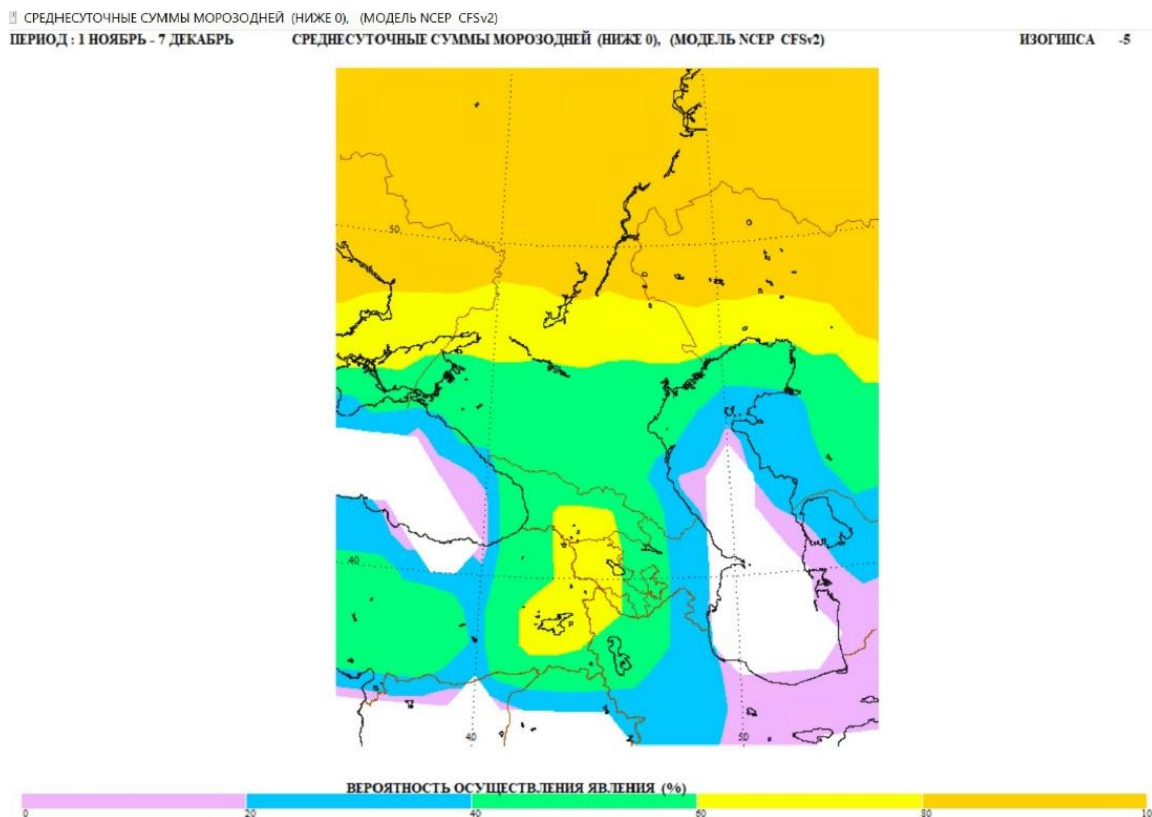
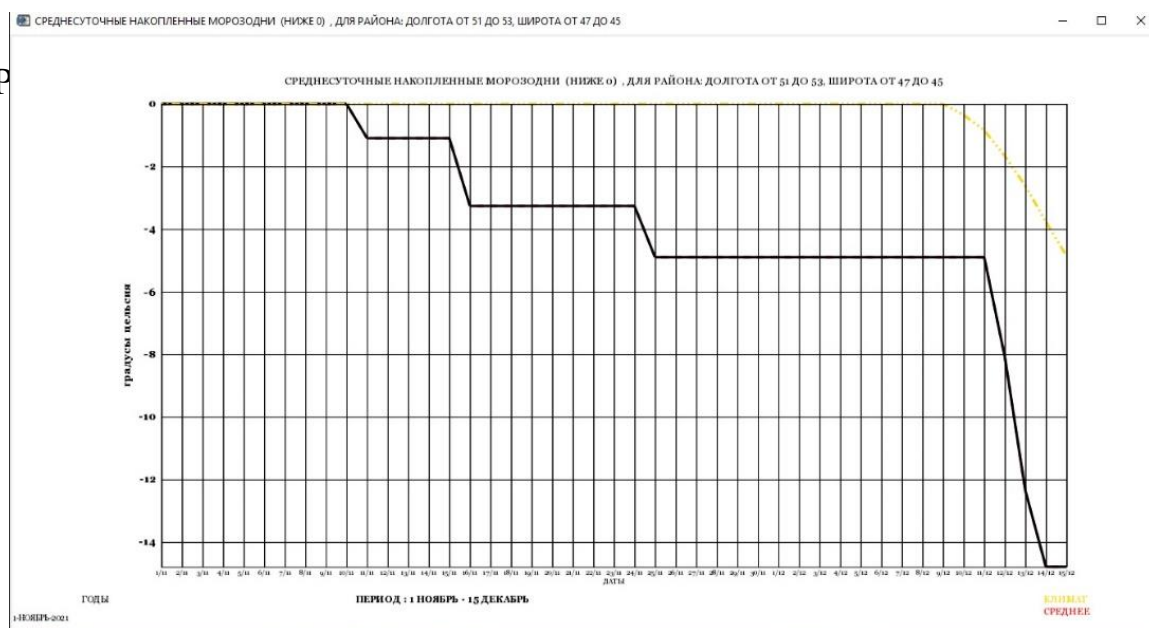


Рисунок 5.2.1.4: Карта превышения сумм градусодней мороза на 7 декабря

График накопления сумм морозодней рассчитывает сумму градусодней мороза по данным реанализа на заданные даты прогноза.

График накопления сумм градусодней мороза рассчитанный по участку моря, ограниченному координатами 51-53 градуса восточной долготы и 45-47 градусов северной широты, построенный по данным реанализа, показывает, что накопление критической суммы морозодней 5 градусов, необходимых для первого появления льда, произошло в период 25 ноября – 11 декабря. А фактическое замерзание северо-восточной части Каспия произошло с 12 до 14 декабря.

Рисунок 5.2.1.5: График накопления сумм градусоусодней



мороза по данным реанализа за период с 1 ноября по 15 декабря

Карта среднесуточной суммы градусоусодней мороза

По карте среднесуточной суммы морозоусодней можно увидеть, как распределяются суммы морозоусодней по географическому расположению на местности.

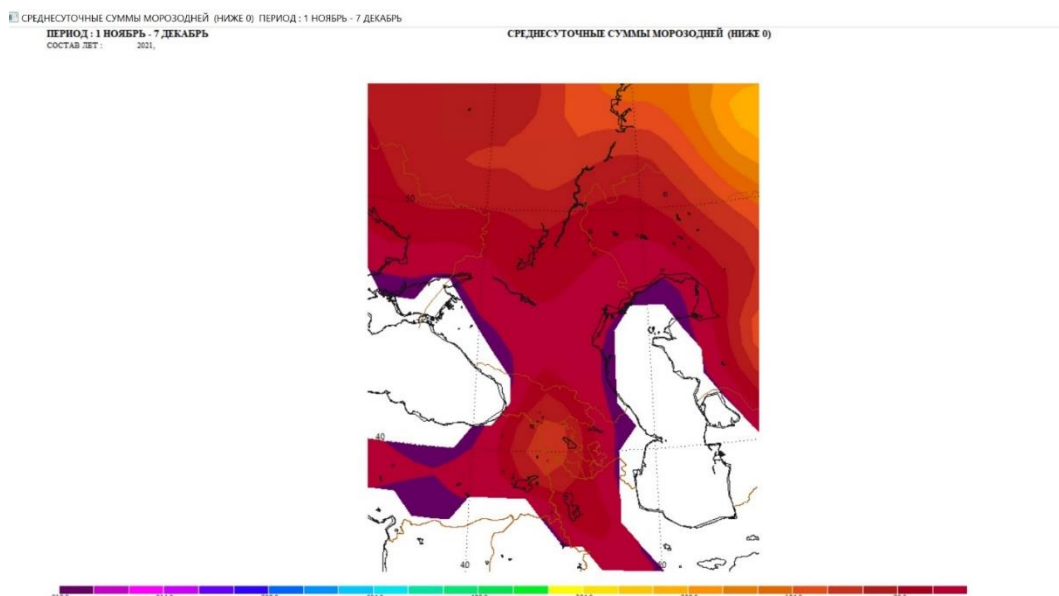


Рисунок 5.2.1.6: Карта среднесуточной суммы морозоусодней

По карте среднесуточной суммы морозоусодней можно спрогнозировать что до 7 декабря появления первого льда будет наблюдаться на севере и

северо-востоке Каспия. В западной части Каспия лед появится с меньшей вероятностью, так как мала сумма градусодней мороза. Вероятность появления первого льда в центральной части северного Каспия равно 0.

Ниже приведены космические снимки (MODIS), где показано



факт
ичес
кое
заме
рзан
ие
север
а
Касп
ия 12

и 13 декабря, 2021 года.

Рисунок 5.2.1.7: Появление первой кромки льда в прибрежной части на северо-востоке Каспия 12 декабря.



Рисунок 5.2.1.8: 13 декабря – распространение кромки льда далее

Предложенный подход показывает результат близкий к реальности.

5.2.2 Прогноз первого появления льда на зимний период 2020-2021

В качестве догосрочного прогноза на зимний период 2020-2021 годов была взята модель CFC v.2, ежедневно рассчитываемая в NCEP/NCAR США. Дата разработки прогноза 23 октября 2020 года. Прогноз составляется на Ноябрь-декабрь 2020 года. Для разработки прогноза использовалось 28 членов ансамбля.

По данным наблюдений фактическое появление льда произошло 15 ноября. Устойчивое появление льда – 18 ноября.

Исходя из предшествующего анализа, в котором нами проводилось исследование соответствия данных температуры реанализа и дат появления льда, было установлено, что для появления первого льда в северо-восточной части Каспия необходимо, чтобы было накоплено в среднем 5°C - 7°C градусов морозодней. Наиболее вероятное появление устойчивого ледового покрова соответствует сумме 30°C - 45°C градусов морозодней. Период, для которого рассчитывалась сумма морозодней по данным ансамблевого прогноза установлен с 20 октября по 18 декабря.

Первое появление льда по среднему значению ансамбля:

Из графика ансамбля прогностических сумм градусов морозодней (Рисунок 5.2.2.1) видно, что накопленные по среднему значению ансамбля суммы, достигают значения 5°C - 7°C 23го ноября. Накопление градусов морозодней начинается с 12 ноября, так как до этого температуры воздуха были положительные. Накопление сумм с 12 ноября постепенно достигает 3.5°C к 16 ноября. С 16 ноября по 22 ноября достигает -4.5°C , и к 23 ноября - 5.7°C . С 23 по 25 ноября сумма накопленных градусов морозодней доходит до 7.7°C . Таким образом, в соответствии со средним прогнозом по ансамблю наиболее вероятным периодом появления ледового покрова является 22-23 ноября. Второй вероятный период появления первого льда можно определить, как дату понижения температур до отрицательных, который пришелся на 12 - 16 ноября.

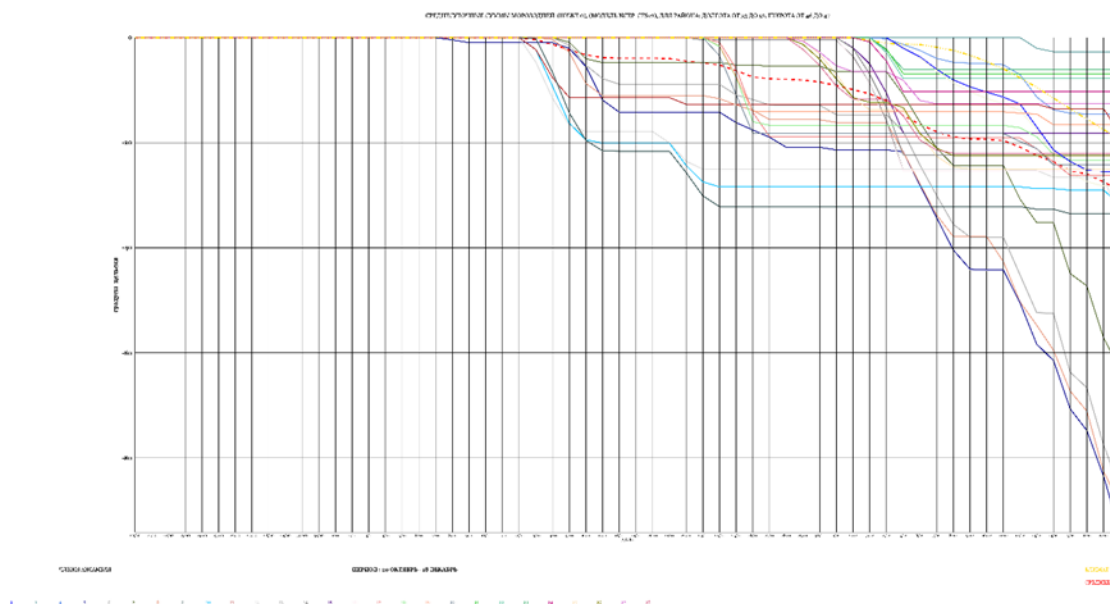


Рисунок 5.2.2.1: График ансамблей прогностических сумм градусодней мороза

Выявление наиболее подходящих для прогноза членов ансамбля

Если рассмотреть фактические данные наблюдений осенних температур воздуха 2020 года мы обнаружим, что имел место резкий переход от положительных температур к отрицательным и зима развивалась стабильно.

Наиболее достоверными членами ансамбля, которые указывают на фактическую дату появления льда являются 26,10 и 12 члены. Эти члены ансамбля показывают начало накопления морозодней 13-14 ноября до -5°C , к 14-15 ноября достигающее -7°C и затем -23°C к 16 ноября. К 18 ноября сумма накопленных морозодней по ансамблю 26 составляет -23°C , а по другим членам ансамбля сумма достигла меньших значений на эту дату.

В связи с тем, что в практике долгосрочного прогноза погоды отсутствует теоретическое обоснование выбора отдельных членов ансамбля из прогностической совокупности так как все члены ансамбля равновероятны, то разработать прогноз по этим членам ансамбля было невозможно, так как у нас не было оснований для их выбора.

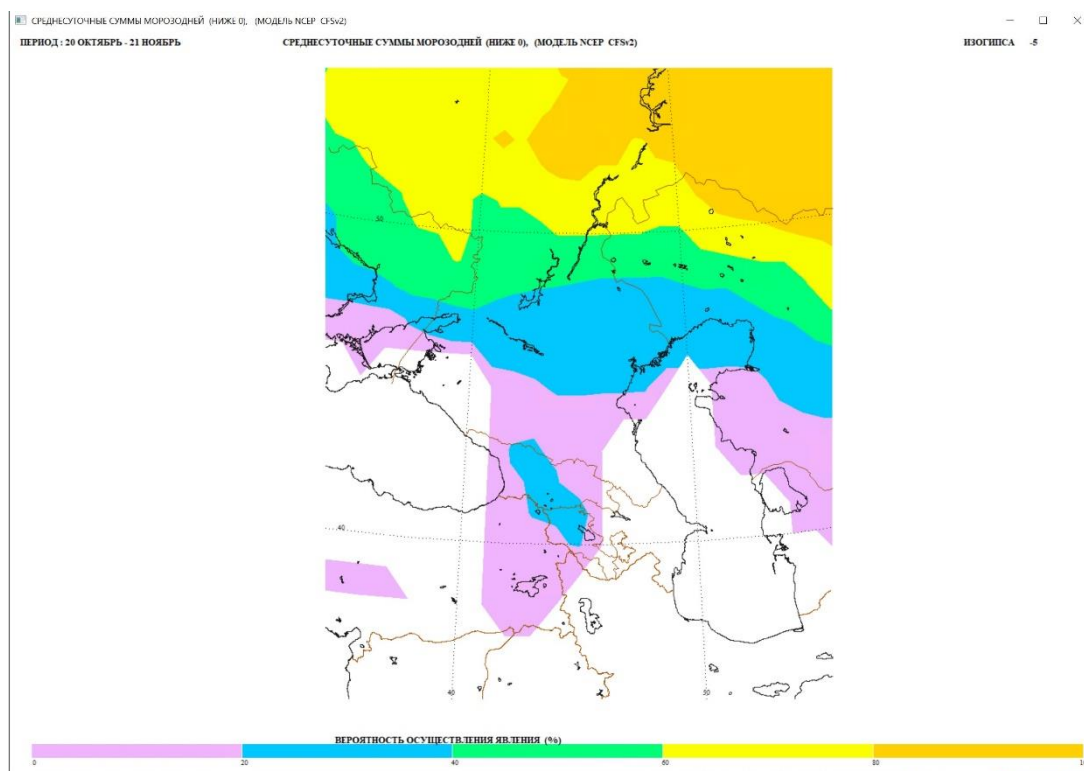
Реальным решением проблемы прогноза в настоящее время является составление вероятностного прогноза замерзания льда.

Вероятность превышения прогностической суммы градусодней мороза на дату фактического установления первого ледового покрова.

Карта вероятности превышения прогноза морозодней показывает с какой вероятностью прогноз прогнозирует появление льда на определенную дату, учитывая, что сумма накопленных морозодней составит -5°C .

На 21 ноября (1 вероятная дата прогноза)

Вероятность установления первого ледового покрова 21 ноября, для всего района северного Каспийского моря составила 20-40%. То есть из 28 членов ансамбля примерно 11 членов показали, что сумма морозодней достигнет 5 градусов и появится лед. С вероятностью 0-20%, что составляет 5 членов ансамбля из 28, ансамблевый прогноз указывает, что лед появится в средней части Каспийского моря.

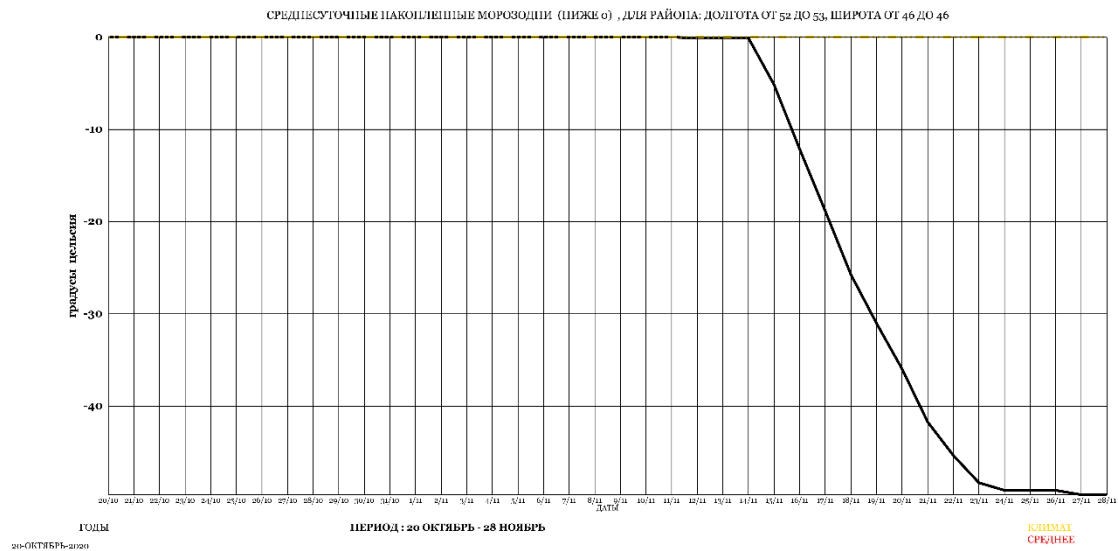


Р
исунок
5.2.2.2:
Карта
превыш
ения
сумм
морозо
дней на
21
ноября

Г
рафик
накопл

ения сумм градусодней мороза рассчитанный по участку моря ограниченному координатами 52-53 градуса восточной долготы и 46 градусов северной широты, построенный по данным реанализа, показывает что накопление

критической суммы морозодней 5 градусов, необходимых для первого появления льда, произошло примерно 15 ноября. Что соответствует фактическому появлению льда в северо-восточной части Каспия, которое произошло 15 ноября.



Р
ис
ун
ок
5.2
.2.
3:
Гр
аф
ик
на
ко
пл

ения сумм градусодней мороза по данным реанализа за период с 20 октября по 28 ноября

Карта среднесуточной суммы градусодней мороза

По карте среднесуточной суммы градусодней мороза можно спрогнозировать что до 21 ноября появления первого льда вероятнее всего начнется в районе мелководной прибрежной северо-восточной части Каспия и распространиться далее на юго-запад. В западной части с меньшей вероятностью появится лед, так как мала сумма градусодней мороза. Вероятность появления первого льда в центральной части северного Каспия и района дельты Волги равна 0.

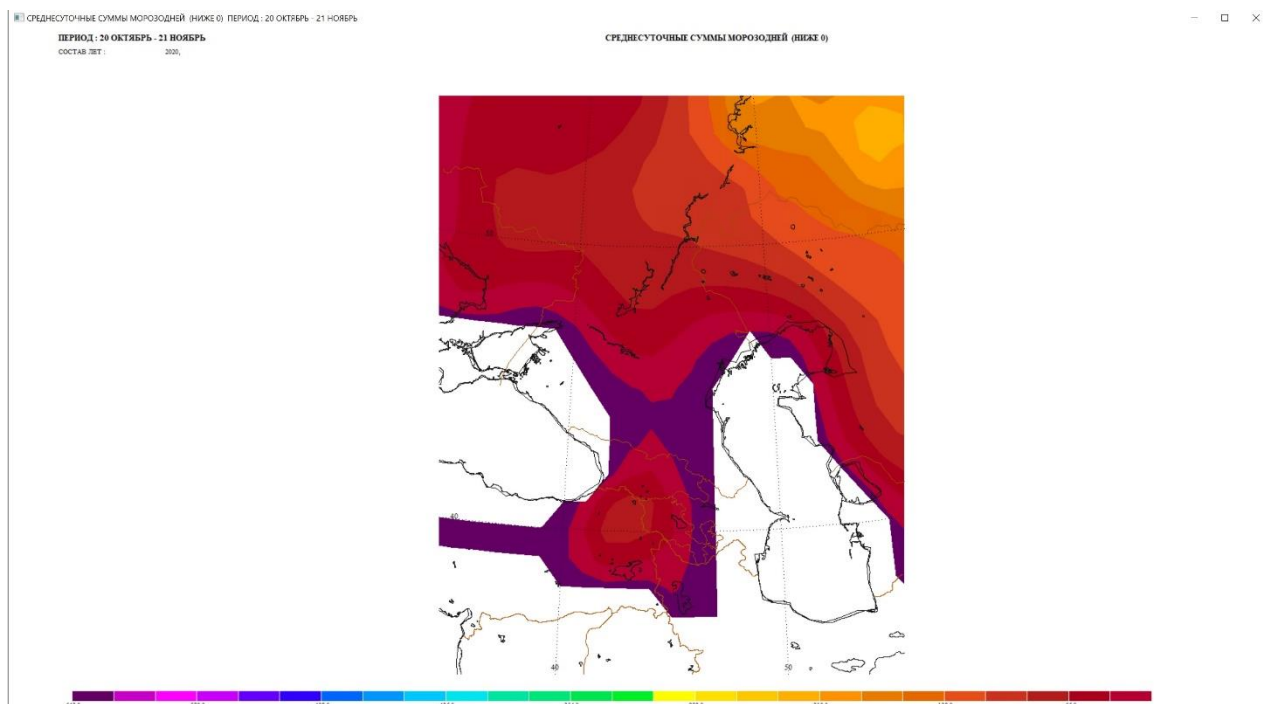


Рисунок 5.2.2.4: Карта среднесуточной суммы градусодней мороза

Ниже приведен космический снимок MODIS, где показано фактическое замерзание севера Каспия 20 ноября, 2020 года

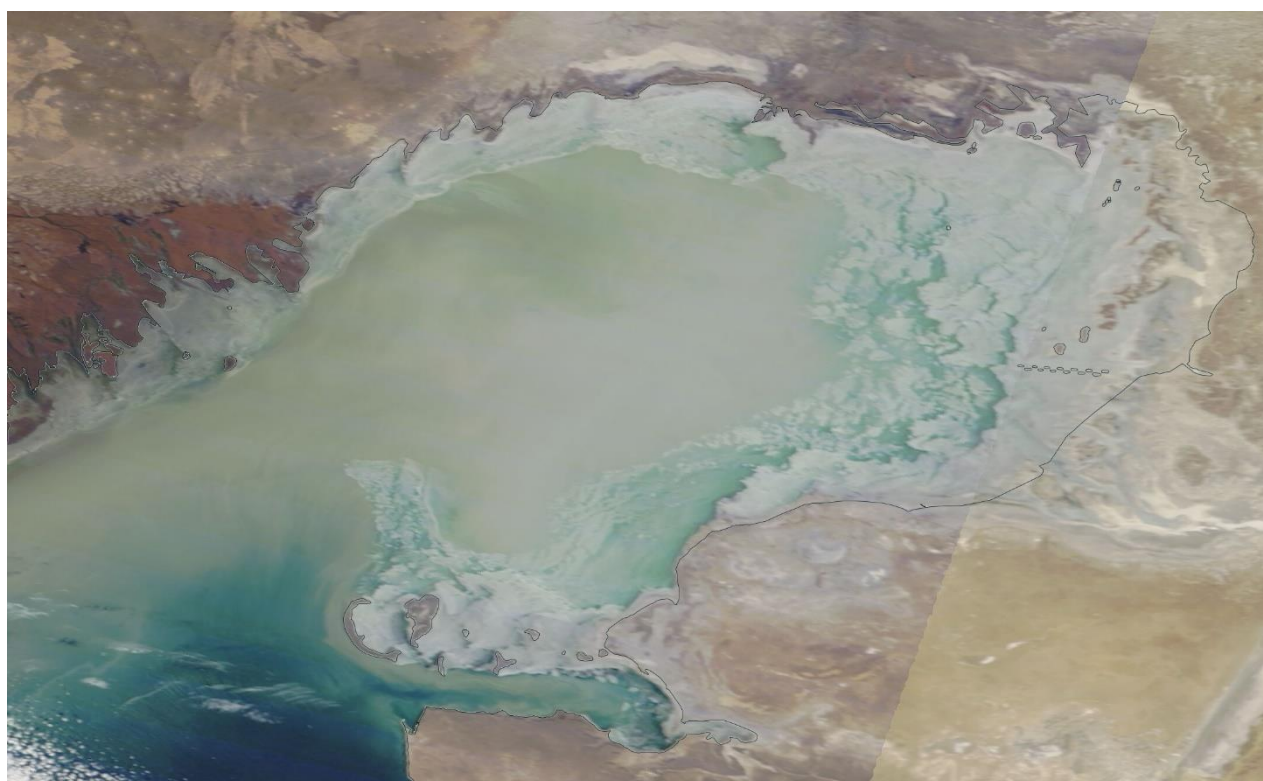


Рисунок 5.2.2.5: 20 ноября, 2020— фактическая ледовая обстановка

ВЫВОДЫ

В данной работе была рассмотрена возможность разработки долгосрочного прогноза появления льда на северо-востоке Каспия методами ансамблевого прогнозирования.

Было установлено следующее:

Статистический анализ установил, что между датами появления льда и датами устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C и -5°C существует тесная связь. Так корреляционная связь между датами первого появления льда и датами достижения температуры значений 0°C и -5°C составили 0.99 и 0.95 соответственно. По данным реанализа температуры корреляция составила 0.96 и 0.72.

Мелководная часть северо-восточной части Каспийского моря может замерзать быстро, достаточно даже незначительных падений температур. Средние суммы градусов морозодней рассчитанные по данным реанализа, для дат первого появления льда составили примерно -5°C -7°C , а для устойчивого появления льда составили примерно -30°C -45°C . Корреляция между датами первого появления льда, рассчитанными по средним суммам градусов морозодней по реанализу и датами, полученными из ряда наблюдений, составила 0.81 (за период 2000-2021).

В трех из 20 зим (15% от общего количества) разница между датами первого появления льда по наблюдениям и реанализу составила наибольшую разницу: 2003-2004 -11 дней; 2005-2006 -20 дней; 2015-2016 -19 дней. Причины этого в неустойчивых процессах ледообразования. После появления льда приходили волны тепла и происходило разрушение льда или уменьшение площади льда. Нужно отметить, что для учета дополнительных причин установления льда в прогнозе, так же должны учитываться другие факторы, влияющие на ледообразование и ледоразрушение - температура воды, скорость ветра и т.д., не рассмотренные в данной работе.

Разница в датах установления льда в остальных зимах периода 2000-2021 составила от 1 до 5 дней (в 85% случаев). Данные реанализа хорошо соответствуют датам, когда происходило устойчивое замерзание северо-восточной части Каспийского моря.

Долгосрочный прогноз методом ансамблей на зимы 2020-2021 и 2021-2022 с заблаговременностью 1-2 месяца показал следующее:

- прогноз дат первого появления льда, рассчитанный по суммам градусов морозодней рассчитанный как среднее по всему ансамблю, показал совпадение их с данными наблюдений с погрешностью примерно 1-7 дней для 2021-2022 и 3-8 дней для 2020-2021.

- из 28 членов ансамбля, прогноз по 4 членам ансамбля оказался наиболее близким к фактической дате замерзания для 2021-2022 года и по 3 членам ансамбля для 2020-2021 года.

График накопления сумм морозодней, построенный по данным реанализа, показывает, что накопление критической суммы морозодней в 5 градусов, необходимых для первого появления льда, произошло в период с 25 ноября по 11 декабря. А фактическое замерзание северо-восточной части Каспия произошло с 8 до 12 декабря. Для ансамблевого прогноза, разработанного на 2020-2021 годы, прогностический график сумм градусов морозодней показал результат, соответствующий фактическому появлению льда, произошедшему 15 ноября.

Прогноз по карте вероятности превышения критической суммы градусов морозодней показывает появление льда на даты 10, 15 и 7 декабря 2021г.

По прогнозу за 2021-2022:

Вероятность установления первого ледового покрова на 10 и 15 декабря, для прибрежных районов мелководной части Каспийского моря составила 80-100%. То есть из 28 членов ансамбля почти все показали, что сумма морозодней достигнет 5 градусов и к 10 декабря появится лед в мелководной

части моря. Уже 15го декабря по прогнозу лед появится на большей территории моря.

Учитывая, что первый лед появился фактически 12 декабря, а устойчивое ледообразование произошло 14 декабря, то прогноз достоверен.

По карте среднесуточных сумм градусов морозодней, постороенной на 7 декабря выявляется высокая вероятность появления льда на севере и северо-востоке Каспия. С меньшей вероятностью прогнозируется появление льда в западной части моря, и с нулевой вероятностью лед появится в центральной части Каспия. Анализ спутниковых снимков подтвердил мой вывод.

По прогнозу за 2020-2021 год:

Вероятность установления первого ледового покрова на 21 ноября, для всего района северного Каспийского моря составила 20-40%. То есть из 28 членов ансамбля примерно 11 членов показали, что сумма морозодней достигнет 5 градусов и появится лед. С вероятностью 0-20%, что составляет 5 членов ансамбля из 28, ансамблевый прогноз указывает на появление льда в средней части Каспийского моря.

По карте среднесуточных сумм градусов морозодней можно спрогнозировать, что к 21 ноября появления первого льда вероятнее всего начнется в районе мелководной прибрежной северо-восточной части Каспия и распространиться далее на юго-запад. В западной части с меньшей вероятностью появится лед, так как мала сумма морозодней. Вероятность появления первого льда в центральной части северного Каспия и района дельты Волги равно 0. Анализ спутниковых снимков подтвердил мой вывод.

Предложенный мною прогностический подход, в двух рассмотренных в данной работе случаях, показал хорошую достоверность. Но для того, чтобы предложенный подход был статистически значим, необходимо проводить дальнейшую серию экспериментов с проверкой прогнозов на историческом материале.

В предложенном методе прогноза пока не учитывались другие факторы, влияющие на ледообразование. Большое значение в составлении прогнозов играет опыт прогнозиста и знание местных особенностей климата, физико-географические и морфометрические условия моря — глубина моря и форма береговой линии, а также свойства и особенности существующего льда в море. Важно исследовать относительную роль всех факторов ледообразования с учетом местных условий и сезона года, что является сложной и трудоемкой задачей и требует дальнейших исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Цепелев В.Ю. Курс лекций
- 2 Цепелев В.Ю. Диссертационная работа
- 3 А.А. Гирс, К. К. (1978). Методы долгосрочных прогнозов. Ленинград: Гидрометеиздат.
- 4 Н.А, М. (2018). Статистические методы долгосрочного прогноза погоды. Казань.
- 5 К.И.Кудрявая, Е. Л. (1974). Морские гидрологические прогнозы. Ленинград: Гидрометеиздат.
- 6 ВМО. (2012). Руководящие указания по системам ансамблевого прогнозирования и прогнозированию. Получено из http://www.wmo.int: http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_en.html
- 7 К. А. Думанская И.О., «Оценка возможности использования прогностических методик XX века в современной практике ледового обслуживания на неарктических морях России,» Санкт-Петербург, 2010.
- 8 Руководство по морским гидрологическим прогнозам, Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1994.
- 9 Ш. Ю. Абузьяров З.К., Морские гидрологические информации и прогнозы, Ленинград: Гидрометеиздат, 1974.
- 10 Абузьяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание – М.: Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2009.- 290 с.
- 11 Под ред. Терзиева Ф.С., Косарева А.Н., Керимова А.А. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 6. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия (Моря СССР) – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992.-290 с.
- 12 Бухарицин П., Исследования каспийских льдов, Palmarium Academic Publishing, 2019.
- 13 Лобанов В.А., Наурозбаева Ж.К., Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. Монография. – СПб.: РГГМУ, 2021.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1: Даты первого появления льда, дат перехода температур через 0°C и -5°C по данным наблюдений и данным реанализа

Данные наблюдений					Данные реанализа			
	даты первого появления льда (наблюдения)	даты устойчивого появления льда (наблюдения)	даты перехода температуры через 0°C (наблюдения)	даты перехода температуры через -5°C (наблюдения)		даты первого появления льда (реанализ)	даты перехода температуры через 0°C (реанализ)	даты перехода температуры через -5°C (реанализ)
2000-2001	9 ноя		11 ноя	28 ноя	2000-2001	9 ноя	22 ноя	7 дек
2001-2002	29 ноя		28 ноя	1 дек	2001-2002	30 ноя	29 ноя	8 дек
2002-2003	30 ноя		26 ноя	1 дек	2002-2003	30 ноя	29 ноя	7 дек
2003-2004	29 ноя		29 ноя	11 дек	2003-2004	11 дек	9 дек	10 янв
2004-2005	26 ноя		25 ноя	30 ноя	2004-2005	1 дек	25 ноя	1 дек
2005-2006	8 дек		5 дек	27 дек	2005-2006	28 дек	26 дек	1 янв
2006-2007	21 ноя		19 ноя	21 ноя	2006-2007	20 ноя	18 ноя	21 ноя
2007-2008	23 ноя		19 ноя	22 ноя	2007-2008	23 ноя	4 дек	23 дек
2008-2009	15 дек		14 дек	16 дек	2008-2009	16 дек	13 дек	15 дек
2009-2010	8 дек		7 дек	8 дек	2009-2010	7 дек	6 дек	15 дек
2010-2011	3 дек		2 дек	2 дек	2010-2011	2 дек	1 дек	3 янв
2011-2012	7 ноя		6 ноя	7 ноя	2011-2012	7 ноя	5 ноя	23 ноя
2012-2013	11 дек		10 дек	11 дек	2012-2013	11 дек	9 дек	10 дек
2013-2014	12 дек		11 дек	16 дек	2013-2014	11 дек	9 дек	11 дек
2014-2015	17 ноя		17 ноя	24 ноя	2014-2015	17 ноя	15 ноя	17 ноя
2015-2016	18 дек		17 дек	18 дек	2015-2016	29 ноя	15 дек	17 дек
2016-2017	16 ноя		16 ноя	20 ноя	2016-2017	16 ноя	15 ноя	7 дек
2017-2018	26 ноя		25 ноя	30 ноя	2017-2018	30 ноя	24 ноя	1 дек
2018-2019	12 ноя	20 дек	11 ноя	24 ноя	2018-2019	12 ноя	11 ноя	15 дек
2019-2020	18 ноя	23 ноя	16 ноя	21 ноя	2019-2020	18 ноя	15 ноя	20 ноя
2020-2021	15 ноя	22 ноя	12 ноя	15 ноя	2020-2021	15 ноя	12 ноя	15 ноя
2021-2022	12 дек	12 дек	11 ноя	15 дек	2021-2022	10 дек	10 дек	12 дек
Среднее	27 ноя		25 ноя	1 дек	Среднее	28 ноя	27 ноя	9 дек
Ранняя дата	7 ноя	22 ноя	6 ноя	7 ноя	Ранняя дата	7 ноя	5 ноя	15 ноя
Поздняя дата	18 дек	20 дек	17 дек	27 дек	Поздняя дата	28 дек	26 дек	10 янв
Корреляция 0°C	0,99				Корреляция 0°C	0,96		
Корреляция -5°C	0,95				Корреляция -5°C	0,72		

Таблица А.2: Суммы градусодней мороза, рассчитанные для дат первого и устойчивого появления льда

Данные наблюдений					Данные реанализа			
	даты первого появления льда (наблюдения)	даты устойчивого появления льда (наблюдения)	Морозодни дат 1го появления льда(наблюдения)	Морозодни дат устойчивого появления льда (наблюдения)	Даты 1го появления льда по реанализу по ср. морозодням (-5;-7)	Даты устойчивого появления льда по реанализу по ср. Морозодням (-30;-45)	морозодни(реанализ дат 1появл льда по наблюд)	морозодни(реанализ дат уст появл льда по наблюд)
2000-2001	9 ноя		24		9 ноя	13 дек	-10	
2001-2002	29 ноя		4		30 ноя	6 дек	-2	
2002-2003	30 ноя		22		30 ноя	4 дек	-3	
2003-2004	29 ноя		7		11 дек	13 янв	0	
2004-2005	26 ноя		5		1 дек	3 янв	-3	
2005-2006	8 дек		15		28 дек	2 янв	0	
2006-2007	21 ноя		17		20 ноя	28 ноя	-17	
2007-2008	23 ноя		32		23 ноя	25 дек	-5	
2008-2009	15 дек		10		16 дек	21 дек	-2,5	
2009-2010	8 дек		17		7 дек	16 дек	-9	
2010-2011	3 дек		18		2 дек	6 янв	-11	
2011-2012	7 ноя		14		7 ноя	3 дек	-9	
2012-2013	11 дек		33		11 дек	14 дек	-8	
2013-2014	12 дек		16		11 дек	19 дек	-18	
2014-2015	17 ноя		24		17 ноя	24 ноя	-10	
2015-2016	18 дек	31 дек	23	41	29 ноя	30 дек	-31	-35
2016-2017	16 ноя	20 ноя	11	32	16 ноя	20 ноя	-5	-37
2017-2018	26 ноя	5 дек	6	34	30 ноя	20 дек	-0,6	-26
2018-2019	12 ноя	15 ноя	5	25	12 ноя	23 ноя	-6	-25
2019-2020	18 ноя	22 ноя	19	50	18 ноя	21 ноя	-1,6	-45
2020-2021	15 ноя	18 ноя	6	31	15 ноя	18 ноя	-5,2	-40,5
2021-2022	12 дек	15 дек	2		10 дек	22 дек	0	-10
Среднее	27 ноя	30 ноя	15,00	35,50	28.11.1900	13.12.1900	-5 до -7	от -30 до -45
Корреляция 1го появления льда (реанализ дат по средней сумме vs даты наблюдения)					0,864576347			
Корреляция устойчивого появления льда (реанализ дат по средней сумме vs даты наблюдения)					0,94108457			