

УДК 551.467.3.03(265.5)

Г.И. Анжина, А.Н. Вражкин*

Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт,
690091, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 24

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ ПАРАМЕТРОВ НА АКВАТОРИЯХ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ БОЛЬШОЙ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТИ

Предложена обобщенная методика физико-статистического прогноза ледовых параметров (средней месячной и декадной ледовитости, среднего месячного положения кромки льда) на акватории дальневосточных морей заблаговременностью более 7 мес. Для расчета прогностического значения ледового параметра используется ансамблевый подход. Формирование ансамбля осуществляется по максимальной величине оправдываемости прогнозов, полученной на независимой выборке. Проведен анализ качества прогнозов ледовых параметров предложенными методами за два ледовых сезона (2015/16–2016/17 гг.). Наиболее эффективными для трех параметров оказались прогнозы для акватории Охотского моря. Средняя оправдываемость климатологических прогнозов изменялась от 61 до 67 %, а методических — от 75 до 83 %. В Японском море максимальная эффективность отмечена в прогнозах средней месячной ледовитости (30 %). В Беринговом море климатологический прогноз средней месячной и декадной ледовитости оказался эффективнее методического, а методический прогноз положения кромки льда (при оправдываемости 65 %) на 11 % превзошел климатологический. В целом осредненные за сезон оправдываемости прогнозов по всем ледовым параметрам на акваториях дальневосточных морей превысили 70 %. Приведенные оценки свидетельствуют о возможности использования для дальневосточных морей методов прогноза средней месячной и декадной ледовитости, а также положения кромки льда.

Ключевые слова: прогноз большой заблаговременности, декадная ледовитость, кромка льда, физико-статистическая модель, ансамблевый подход, оправдываемость прогнозов.

DOI: 10.26428/1606-9919-2018-194-239-250.

Anzhina G.I., Vrazhkin A.N. Method for predicting the ice cover parameters in the waters of the Far-Eastern Seas with a long lead time // Izv. TINRO. — 2018. — Vol. 194. — P. 239–250.

New method for long-term forecasting of mean month and mean 10-days values of the ice cover and position of the ice edge in the Far-Eastern Seas is presented. The sea ice regime is formed under influence of thermal and dynamic patterns in the atmosphere and hydrosphere, though mechanisms of its forming and evolution are not yet completely clear, so the sea ice forecasting is based mainly on statistical methods. The new method is developed for the ice parameters prediction for the period with stable ice cover. It uses a physical-statistical model

* Анжина Галина Ивановна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: hydromet@mail.ru; Вражкин Александр Николаевич, кандидат технических наук, заведующий отделом, e-mail: van@ferhri.ru.

Anzhina Galina I., Ph.D., leading researcher, e-mail: hydromet@mail.ru; Vrazhkin Alexandr N., Ph.D., head of department, e-mail: van@ferhri.ru.

with ensemble approach. The minimum lead time of this method is 7 months. The model assimilates the data on absolute topography of 500 GPa surface, atmospheric pressure at the sea level, air temperature at 850 GPa surface and at the sea surface, relative topography of 500/1000 GPa surfaces, and the South Oscillation index. Archives of these fields for the Northern Hemisphere from 1961 to 2017 are loaded. The ensemble of predictions is formed using the criterion of their maximum accuracy on independent data sets. The method is tested for the winter seasons of 2015/2016 and 2016/2017. The most accurate by 3 parameters are the forecasts for the Okhotsk Sea with the average accuracy 75–83 % that is much better than the accuracy of climatic forecasts (61–67 %). The forecast of the mean month ice cover only is satisfactory for the Japan Sea, and the forecast of the ice edge position only (65 % accuracy) exceeds the climate forecasting accuracy for the Bering Sea, while the climatic forecasting shows better results for the ice cover. The average accuracy of forecasting with new method (all parameters for all seas) exceeds 70 %, that allows to recommend the method for practical using. A prognostic product could be proposed as charts of the sea ice edge for future winter with estimations of the ice cover for each sea by months and 10-days.

Key words: long-term forecast, ice cover, ice edge, physical-statistical model, ensemble approach, forecast accuracy.

Введение

Для обеспечения успешного функционирования морских отраслей экономики на частично замерзающих Беринговом, Охотском и Японском морях необходима информация о ледовых условиях на их акваториях.

Существующие в настоящее время методы прогнозирования ледовых характеристик базируются на том факте, что ледовый режим на морях формируется под влиянием термического и динамического состояния атмосферы и гидросферы и взаимодействия этих сред. Однако важные свойства структуры вод в толще моря, влияющие на процессы льдообразования (Петров, 1989, 2000), из-за отсутствия соответствующих данных, как правило, учитываются только косвенно. Механизм образования и эволюции ледового режима исследуется в основном статистическими методами (Оганесян, 1975; Каракаш, Короб, 1988; Плотников, 1996), которые также позволяют с большой заблаговременностью получить количественный прогноз ледовых параметров. Так, А.М. Поляковой (2012) предложен регрессионный метод прогноза ледовитости Охотского и Берингова морей заблаговременностью 4 года и более. В.В. Плотниковым (1996, 2002) предлагается количественный прогноз интегральных показателей ледовых условий от 3 мес. до года и от 1 декады до 3 мес. С помощью численных моделей адекватно представить распределение льдов на акватории моря удастся с заблаговременностью до 5 сут (Клячкин и др., 2015).

Обзоры литературы и обширную библиографию по методам прогноза ледовых характеристик на морях можно найти в различных изданиях (Каракаш, Юшак, 1966; Каракаш, 1975; Плотников, 1985, 2002; Гидрометеорология..., 1998, 1999, 2003*; Четырбоцкий, Плотников, 2005).

Долгосрочный прогноз ледовых условий на российских морях (включая дальневосточные) на предстоящую зиму оперативно составляется в морском отделе ФГБУ «Гидрометцентр России». Ежегодно в начале октября пользователям рассылается бюллетень «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на предстоящий ледовый сезон». В нем помещены прогнозы ряда характеристик по пунктам неарктических морей: сумма градусодней мороза; первое появление льда; максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость; максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда; дата окончательного очищения моря ото льда; продолжительность ледового периода (Думанская, 2015). Других официальных долгосрочных прогнозов ледовых условий на акваториях дальневосточных морей авторам найти не удалось.

* Гидрометеорология и гидрохимия морей. В 10 т. Т. 10: Берингово море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. 301 с.; Т. 9: Охотское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 343 с.; Т. 8: Японское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. 397 с.

Начиная с 2005 г. в ДВНИГМИ ведутся работы по созданию технологической линии, позволяющей максимально автоматизировать как процесс подготовки исходных данных к прогнозу, так и прогностический блок. Созданная в ходе исследований прогностическая физико-статистическая модель технически совершенствуется, появляются новые программные блоки, реализующие новые способы расчета прогнозируемых характеристик, расширяется число исходных данных, которые формируются по архивам ре-анализа и другим источникам (Anzhina, Vrazhkin, 2008, 2016; Анжина, Вражкин, 2010а, б, 2012, 2015, 2017).

Объектами исследования в настоящей работе являются среднемесячная и декадная ледовитости, а также среднемесячное положение кромки льда на акватории моря. Прогнозирование ледовых параметров осуществляется с минимальной заблаговременностью 7 мес. на период ледового сезона с наиболее устойчивым ледовым покровом (с декабря по май для Берингова и Охотского морей и с декабря по апрель — для Японского моря).

Материалы и методы

При разработке метода долгосрочного прогноза ледовых параметров в качестве исходной информации использовались архивы полей в границах Северного полушария за период с 1961 по 2017 г.: геопотенциал на уровне 500 гПа, давление на уровне моря, температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа, поля относительной топографии $OT_{500/1000}$, температура поверхности Земли. Кроме того, учитывалась интегральная характеристика «Южного Колебания» — SOI (стандартизованная разность значений давления на станциях Таити и Дарвин).

Архивы по ледовитости дальневосточных морей сформированы с привлечением данных ледовых авиаразведок, модельной сплочённости NCER, еженедельных данных Национального ледового центра США (NIC).

Для численного представления кромки льда на акватории моря использовалась система фиксированных направлений*.

Климатические значения (нормы) и средние квадратические отклонения от нормы (σ) рассчитаны для каждого месяца по 30-летнему базовому периоду 1971–2000 гг. для всех упомянутых исходных данных.

Общую структуру созданной физико-статистической прогностической модели можно представить в виде трех элементов: блоков препроцессинга и постпроцессинга, «ядра» модели. Основные расчеты производятся в «ядре» модели. Первый блок используется для предварительной обработки входных данных, включающей в основном их преобразование в форматы, необходимые для работы модели. Во втором осуществляется отбор наиболее адекватных моделей, пригодных для дальнейшего использования в прогностических целях, и происходит формирование выходной продукции.

«Ядро» модели является общим для всех упомянутых прогнозируемых параметров (среднемесячная и декадная ледовитость, положение кромки льда), а первый и второй блоки имеют особенности для осуществления прогнозов по каждому из трех параметров.

Алгоритм построения физико-статистической модели достаточно подробно изложен в предыдущих публикациях (Anzhina, Vrazhkin, 2008, 2016; Анжина, Вражкин, 2010а, б, 2012, 2015, 2017).

Обратим внимание на некоторые моменты. Так, поиск предикторов в полях гидрометеопараметров осуществляется при каждом просчете способом, описанным Р.Я. Жежко (Жежко, Толмачева, 1990).

Прогностические значения рассчитываются в результате составления и решения уравнения множественной линейной регрессии и аналоговыми методами и представляются в категоричной форме.

* Гидрометеорология и гидрохимия морей. В 10 т. Т. 10: Берингово море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. 301 с.; Т. 9: Охотское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 343 с.; Т. 8: Японское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. 397 с.

Величины месячной и декадной ледовитости выражаются в процентах, а расстояние по фиксированному направлению до границы льда — в морских милях.

Задавая основные параметры физико-статистической модели (набор исходных полей или рядов, месяца прогноза и его заблаговременности, метода расчета предиктанта), можно сформировать массив прогностических значений ледовой характеристики. Например, если использовать в качестве исходной информацию по 7 упомянутым гидрометеорологическим параметрам, для 6 заблаговременностей (от 7 до 12 мес.) и 3 способов расчета предиктанта (по уравнениям регрессии и двум аналоговым) можно построить 126 вариантов прогностической модели («индивидуальных моделей») и получить 126 значений ледового параметра.

Окончательный прогноз ледовых параметров осуществляется с использованием ансамблевого подхода (Муравьев, Куликова, 2005; Анжина, Вражкин, 2010а, б, 2017; Думанская, 2011а, б, 2015; Хан и др., 2011; Астахова и др., 2016; Anzhina, Vrazhkin, 2016).

Заметим, что в модели применена адаптивная схема при расчетах прогностических значений, т.е. с получением новых данных происходит изменение конфигурации индивидуальных моделей.

Предусмотрены единые для исследуемых ледовых параметров критерии оценки качества прогнозов, полученных по индивидуальным моделям на независимой выборке. Оценка производится в соответствии с наставлением по службе прогнозов* и методическими указаниями по проведению оперативных испытаний**. Для заблаговременности более 6 мес. прогноз считается оправдавшимся ($P\% = 100$), если ошибка Δ (разность прогностического и фактического значений) не превышает среднее квадратическое отклонение ($\pm\sigma$). Успешность прогнозов положения кромки льда оценивалась по каждому лучу также по упомянутым выше критериям. Оправдываемость прогноза всей кромки определялась как среднее арифметическое из оправдываемости по лучам.

Метод считается применимым для практического использования, если его обеспеченность превышает природную обеспеченность. Поэтому для сравнения рассчитывались и оценивались климатологические прогнозы.

Для количественной оценки успешности прогнозов помимо оправдываемости к анализу также привлечен наиболее часто употребляемый показатель качества прогнозов — абсолютная ошибка прогноза ($|\Delta| = |P - \Phi|$, где P — прогностическое, Φ — фактическое значение параметра). При этом $|\Delta|_{\text{кл}}$ обозначает ошибку климатологического прогноза, $|\Delta|_{\text{м}}$ — ошибку методического прогноза. Для оценки эффективности использования методических прогнозов рассчитана разность оправдываемости методического и климатологического прогнозов: $(P_{\text{м}} - P_{\text{кл}})\%$. Знак плюс при вычислении эффективности прогнозов указывает на преимущество методических прогнозов над климатологическими, а минус — наоборот. При разности, равной нулю, методические прогнозы находятся на одном уровне с климатологическими**.

Результаты и их обсуждение

Первоначально был разработан метод долгосрочного прогноза средней месячной ледовитости Охотского моря (Anzhina, Vrazhkin, 2008), а затем Японского и Берингова морей (Анжина и др., 2013). В дальнейшем был представлен метод прогноза декадной ледовитости на акваториях дальневосточных морей и предложен метод согласования среднемесячных и декадных прогнозов (Анжина, Вражкин, 2017), что позволяет представить прогноз средней месячной ледовитости с детализацией по декадам. Описание разработанного метода гибридного прогноза среднемесячного положения кромки льда на акваториях Охотского, Берингова, Японского (Татарского пролива) морей дано в предыдущих публикациях (Анжина, Вражкин, 2015; Anzhina, Vrazhkin, 2016).

* Наставление по службе прогнозов. Раздел 3, ч. 3. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: Триада, лтд, 2011. 201 с.

** Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов: РД 52.27.284-91: ввод в действие с 01.01.92. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 152 с.

Проведем анализ качества прогнозов ледовых параметров (положения кромки льда, средней месячной и декадной ледовитости) предложенными методами по результатам оценки оправдываемости прогнозов за два ледовых сезона (2015/16–2016/17 гг.) в сравнении с климатологическими прогнозами за этот же период. Материалами для корректного сравнения с другими аналогичными методами прогноза авторы не располагают.

При прогнозе на начальный ледовый сезон двухлетнего периода апробации разработанных методов, формирование ансамблей осуществлялось отбором индивидуальных моделей по величине оправдываемости прогнозов, осреднённой на 14-летней проверочной выборке (в основном более 70 %).

Качество фонового прогноза положения кромки льда на акваториях дальневосточных морей. Ледовые сезоны 2015/16–2016/17 гг. характеризовались заметными (превышающими средние квадратические отклонения) аномалиями в положении кромки льда по фиксированным направлениям на акваториях Берингова и Охотского морей. Более аномальным был ледовый сезон 2016/17 г. Наиболее часто положение кромки льда отличалось от среднего многолетнего в Беринговом море.

Как следует из анализа результатов оценки прогнозов положения кромки льда на акваториях дальневосточных морей, осредненных за два года (табл. 1), упомянутые аномалии в положении границы льда частично были предсказаны в методических прогнозах. Так, во все месяцы ледовых сезонов оправдываемость климатологических прогнозов в Беринговом и Охотском морях была ниже оправдываемости методических прогнозов. В табл. 1 жирным шрифтом выделены оправдываемости прогнозов, превышающие 70 %, а жирным курсивом — минимальные абсолютные ошибки.

Таблица 1
Оценки качества прогнозов положения кромки льда на акваториях дальневосточных морей, осредненные за два ледовых сезона (2015/16–2016/17 гг.)

Table 1
Accuracy of the sea ice edge predictions for the Far-Eastern Seas averaged for two years (2015/16–2016/17)

Оценка	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Сезон
<i>Берингово море</i>							
$ \Delta _M$	20,0	38,3	39,4	41,3	30,8	34,1	34,0
$P\%_M$	61,3	41,9	50,0	61,3	83,9	93,5	65,3
$ \Delta _{кл}$	29,5	45,0	42,4	43,0	37,6	40,8	39,7
$P\%_{кл}$	48,4	29,0	40,3	58,1	80,6	69,4	54,3
$P\%_M - P\%_{кл}$	12,9	12,9	9,7	3,3	3,3	24,2	11,0
<i>Охотское море</i>							
$ \Delta _M$	33,7	31,9	35,5	54,1	51,3	24,2	38,4
$P\%_M$	66,7	81,0	85,7	57,2	76,2	92,9	76,6
$ \Delta _{кл}$	29,5	40,2	52,9	65,7	72,1	38,9	49,9
$P\%_{кл}$	64,3	73,8	73,8	54,8	52,4	73,8	65,5
$P\%_M - P\%_{кл}$	2,4	7,2	11,9	2,4	23,8	19,1	11,2
<i>Японское море</i>							
$ \Delta _M$	3,7	3,8	5,8	3,3	5,1	–	4,3
$P\%_M$	97,2	97,2	97,2	97,2	100,0	–	97,8
$ \Delta _{кл}$	3,9	3,3	4,2	4,5	5,6	–	4,3
$P\%_{кл}$	97,2	97,2	97,2	94,4	100,0	–	97,2
$P\%_M - P\%_{кл}$	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	–	0,6

Примечание. Абсолютная ошибка $|\Delta|$ в морских милях.

Отмечаются положительные значения эффективности прогнозов по каждому месяцу в Беринговом и Охотском морях. Осредненная за сезон эффективность составила 11 %. При этом абсолютная ошибка методических прогнозов оказалась меньше, чем ошибка климатологических прогнозов. В январе и феврале в Беринговом море, а в марте в Охотском море оправдываемость прогноза оказалась меньше 60 %. Однако

аналогичная оправдываемость климатологических прогнозов в эти месяцы в Беринговом море составила соответственно 29 и 40 %, а в Охотском море — 55 %. В Японском море $P\%$ оказалась высокой и в методическом, и в климатологическом прогнозах (более 90 % во все месяцы сезона), а абсолютная ошибка одинаковой.

Для качественной оценки успешности методических прогнозов приведем карты, где изображены фактическое, прогностическое и климатическое положения кромок льда для «удачных» и «неудачных» прогнозов. Пример «неудачного» прогноза кромок льда в Беринговом и Охотском морях (март 2017 г.) представлен на рис. 1, а «удачного» (май 2016 г.) — на рис. 2.

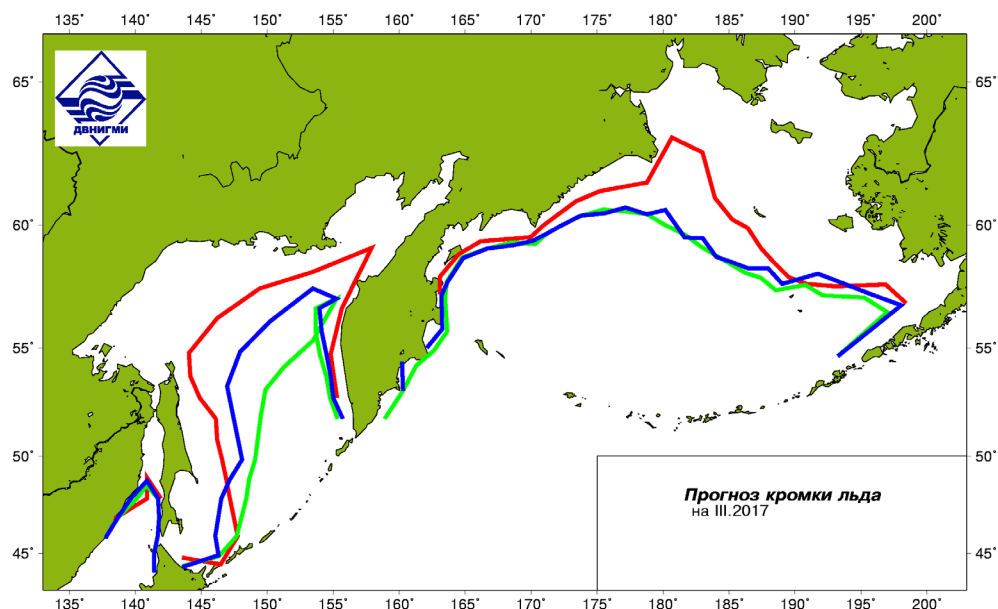


Рис. 1. Границы льда на акваториях дальневосточных морей в марте 2017 г.: *красный цвет* — фактическая; *синий* — методическая; *зеленый* — климатическая

Fig. 1. The sea ice edge in the Far-Eastern Seas in March 2017: *red line* — actual; *blue line* — predicted; *green line* — climatic

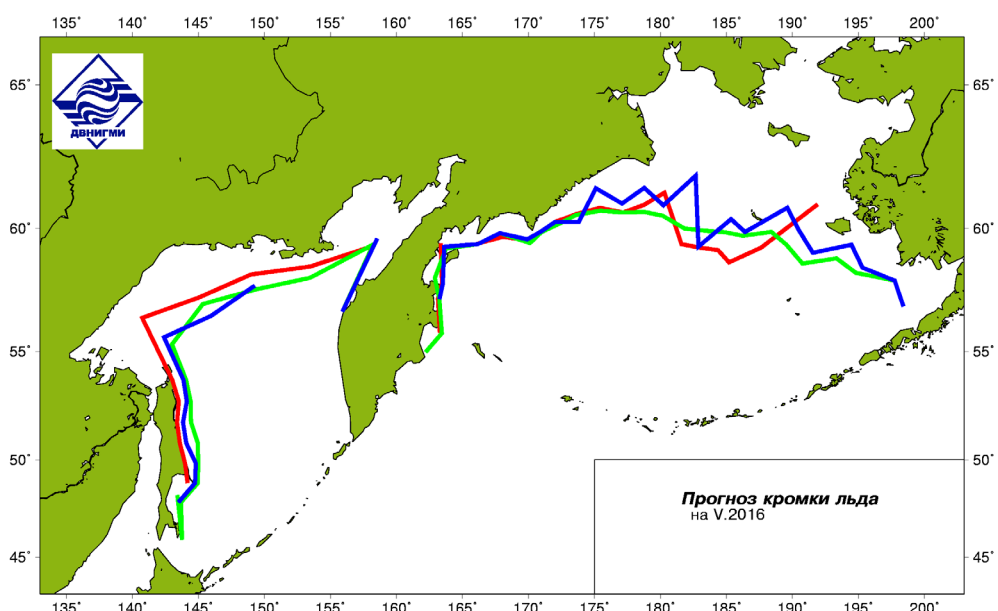


Рис. 2. Границы льда на акваториях дальневосточных морей в мае 2016 г.: *красный цвет* — фактическая; *синий* — методическая; *зеленый* — климатическая

Fig. 2. The sea ice edge in the Far-Eastern Seas in May 2016: *red line* — actual; *blue line* — predicted; *green line* — climatic

В случае «неудачного» прогноза разница между положениями фактической и прогностической кромок хорошо заметна по всем фиксированным направлениям, а в «удачном» разница проявляется только по отдельным направлениям (лучам).

Качество прогнозов средней месячной ледовитости с детализацией по декадам на акваториях дальневосточных морей. Методики прогноза среднемесячной и декадной ледовитости, как отмечалось выше, в основных чертах совпадают. Оценку успешности прогноза среднемесячной ледовитости можно найти в статье Г.И. Анжиной с соавторами (2013).

Продemonстрируем качество прогнозов декадной ледовитости по результатам вычислительных экспериментов по физико-статистической модели на 14-летней проверочной выборке 2001/02–2014/15 гг. в сравнении с климатологическими прогнозами, осуществленными по тому же периоду. По осредненным за 14 лет значениям оправдываемости отобраны варианты модели с максимальной оправдываемостью. По обоим видам прогноза определено количество декад в ледовом сезоне (из 18 декад в Беринговом и Охотском морях и 15 декад в Японском море) с одинаковой оправдываемостью (рис. 3).

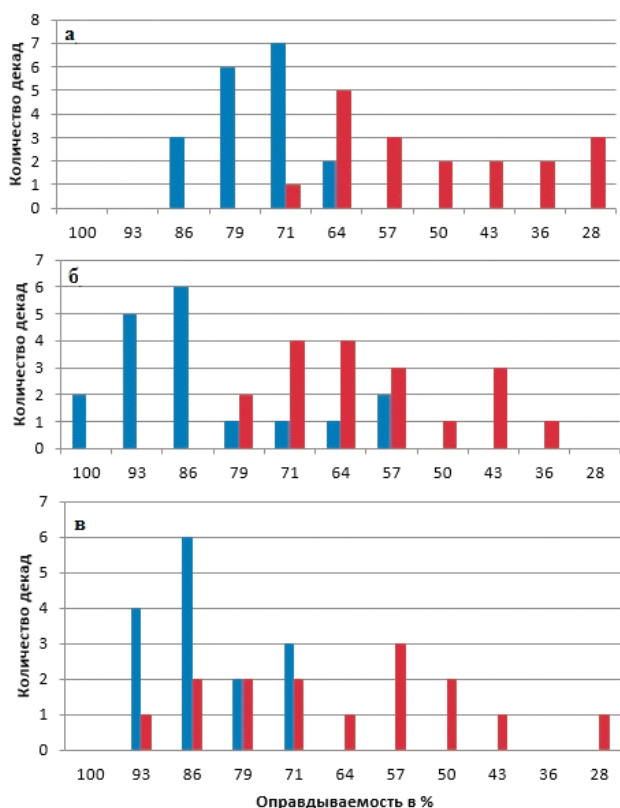


Рис. 3. Количество декад ледового сезона с оправдываемостью от 100 до 28 % в Беринговом (а), Охотском (б) и Японском (в) морях: синий — методический, красный — климатологический прогноз

Fig. 3. Number of 10-days with accuracy of the ice cover predictions 28–100 % for the Bering Sea (a), Okhotsk Sea (б), Japan Sea (в): blue line — predicted ice edge, red line — climatic ice edge

Анализ рис. 3 свидетельствует о явном преимуществе за указанный период методических прогнозов перед климатологическими. В Охотском море в 83 % случаев, в Беринговом — в 89, в Японском — в 100 % преобладают прогнозы с $P\% > 70$. При этом для климатологических прогнозов характерна оправдываемость менее 57 %. В Беринговом море такие прогнозы составляют 50 %, в Охотском — 28 и Японском — 27 %. Поэтому при формировании ансамблей для прогноза декадной ледовитости критерием отбора послужила величина $P\%$, превышающая 70 %.

По результатам декадных прогнозов ледовитости на сезоны 2015/16–2016/17 гг. оценивалось их качество и проверялось правило согласования декадных и месячных прогнозов ледовитости.

Осредненная за сезон оправдываемость прогнозов ледовитости по каждой из 3 декад превысила 80 % для Охотского и Японского морей по обоим периодам. Для Берингова моря Р% оказалась несколько ниже 80 % (74–79 %). При анализе Р% по месяцам получаем более пеструю картину в Японском и Охотском морях, а в Беринговом — более однородную.

В табл. 2 помещены осредненные по сезону за 2 года оправдываемости климатологических прогнозов на декаду, методических декадных и прогнозов на декаду, согласованных со среднемесячными прогнозами. Кроме того, представлена оправдываемость среднемесячных прогнозов, рассчитанных по декадным, которая определялась по величине допустимой ошибки ($\pm\sigma$). Жирным шрифтом отмечена оправдываемость прогнозов больше 70 %.

Таблица 2

Оправдываемость декадных и месячных прогнозов ледовитости дальневосточных морей, осредненная за ледовые сезоны 2015/16–2016/17 гг.

Table 2

Accuracy for predictions of 10-days ($P\%_d$) and mean month ($P\%_m$) ice cover in the Far-Eastern Seas averaged for two years (2015/16–2016/17)

Метод	Берингово море				Охотское море				Японское море			
	$P\%_m$	$P\%_d$			$P\%_m$	$P\%_d$			$P\%_m$	$P\%_d$		
		1	2	3		1	2	3		1	2	3
$L_{дек}$	75	75	92	58	83	75	83	83	80	60	100	90
$L_{дек\ c}$	83	75	92	75	83	75	83	75	80	70	100	80
$L_{клим}$	92	92	92	67	67	75	67	42	60	70	80	80

Примечание. $L_{дек}$ — методический прогноз на декаду; $L_{дек\ c}$ — методический прогноз на декаду, согласованный; $L_{клим}$ — климатологический прогноз; $P\%$ — оправдываемость декадных (д) и средних месячных прогнозов (м), рассчитанных по декадным значениям.

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, позволяет отметить преимущественное превосходство декадного методического прогноза над декадным климатологическим для Охотского и Японского морей. По средним за месяц оценкам методический прогноз в этих морях также оказался эффективнее. Положительный эффект от согласования декадного прогноза ледовитости с разработанным ранее месячным прогнозом ледовитости проявился в двух декадах (в 3-й — в Беринговом море и в 1-й — в Японском море). Уменьшение Р% произошло также в двух декадах (в 3-й декаде в Охотском и Японском морях). По средним за месяц оценкам в Беринговом море согласованный декадный прогноз оказался удачнее декадного, в Японском — на одном уровне, а в Охотском — оценки оказались близкими. Представленные результаты позволяют сделать вывод, что можно дать более или менее адекватную картину распределения ледовитости по декадам месяца на акваториях дальневосточных морей.

Качество прогнозов средней месячной ледовитости на акваториях дальневосточных морей заблаговременностью больше года. Дополним анализ качества разработанных методов прогноза ледовых параметров оценкой прогнозов средней месячной ледовитости, осуществленных с максимальной заблаговременностью до 2 лет. Такие прогнозы могут быть полезными для решения стратегических задач при планировании производственной деятельности на дальневосточных морях. Поскольку основополагающие принципы, используемые при разработке упомянутых выше методов долгосрочного прогноза ледовых параметров, традиционно учитывают крупномасштабные процессы взаимодействия атмосферы и океана, а также существующие в природе длиннопериодные циклические колебания, представляется целесообразным проведение численных экспериментов по модели с заблаговременностью более года. В предшествующих исследованиях (Анжина, Вражкин, 2010б) приведены оценки

прогноза средней месячной ледовитости Японского моря с заблаговременностью до 2 лет по индивидуальным моделям. Аналогичные расчеты проведены за ледовые сезоны 2015/16–2016/17 гг. для акваторий трех морей с использованием ансамблевого подхода (табл. 3), показаны оценки (ошибка прогноза, абсолютная ошибка и оправдываемость) прогнозов средней месячной ледовитости заблаговременностью от 7 до 12 мес., от 13 до 24 мес. и климатологических прогнозов как средние величины, полученные за два ледовых сезона. Жирным шрифтом в табл. 3 отмечены оправдываемости больше 70 %.

Таблица 3

Оценки месячных прогнозов ледовитости дальневосточных морей, осредненные за ледовые сезоны 2015/16–2016/17 гг.

Table 3

Errors and accuracy of monthly forecasts of the ice cover in the Far-Eastern Seas averaged for two years (2015/16–2016/17)

Вид прогноза	Берингово море			Охотское море			Японское море		
	Δ	$ \Delta $	P%	Δ	$ \Delta $	P%	Δ	$ \Delta $	P%
L_{12}	2,6	4,1	83,3	1,2	7,0	83,3	–0,92	2,36	90
L_{24}	3,3	5,3	83,3	18,8	23,7	75,0	–1,77	2,59	90
$L_{\text{клим}}$	2,2	3,6	91,7	11,1	11,1	66,7	2,98	2,98	60

Примечание. L_{12} — методический прогноз заблаговременностью 7–12 мес.; L_{24} — методический прогноз заблаговременностью 13–24 мес.; $L_{\text{клим}}$ — климатологический прогноз; P% — оправдываемость; Δ — ошибка; $|\Delta|$ — абсолютная ошибка прогнозов.

В среднем за сезон на акваториях дальневосточных морей наблюдается пониженное значение ледовитости (положительное значение Δ в климатологическом прогнозе). При прогнозировании средней месячной ледовитости заблаговременностью до и больше года отмечается завышение значений ледовитости в Беринговом и Охотском морях и занижение — в Японском море.

При сравнении оправдываемости методических и климатологических прогнозов в Беринговом море эффективнее оказались климатологические, а в Охотском и Японском морях — методические прогнозы. Качество методических прогнозов ледовитости с заблаговременностью более года оказалось ниже, чем с заблаговременностью до года, в Охотском море и по P%, и по абсолютной ошибке. В Беринговом и Японском морях оценки $|\Delta|$ в методических прогнозах L_{12} и L_{24} оказались близки, а оправдываемости — одинаковы.

Проведенный анализ оценок позволяет считать приемлемым использование прогноза ледовитости на акваториях дальневосточных морей с заблаговременностью до двух лет.

Заключение

Совместное использование представленных методов прогноза среднемесячного положения кромки льда на акваториях дальневосточных морей и прогноза средней месячной ледовитости с детализацией по декадам, исходя из удовлетворительных оценок (оправдываемость более 70 %), позволяет дать общее представление об ожидаемых ледовых условиях с заблаговременностью не менее 7 мес.

Список литературы

Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Ансамблевый подход к долгосрочному прогнозу ледовитости Берингова моря с заблаговременностью более 6 месяцев // ДВНИГМИ — 60 лет. — Владивосток : Дальнаука, 2010а. — С. 145–157.

Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Ледовитость Японского моря и метод прогноза её средних месячных значений с большой заблаговременностью // ДВНИГМИ — 60 лет. — Владивосток : Дальнаука, 2010б. — С. 134–144.

Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Визуальная интерпретация категорических прогнозов ледовитости дальневосточных морей // Тр. ДВНИГМИ. — 2012. — Вып. 154. — С. 91–100.

Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Прогноз с большой заблаговременностью среднемесячной ледовитости дальневосточных морей с детализацией по декадам // Тр. ДВНИГМИ. — 2017. — Вып. 155. — С. 141–156.

Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Фоновый прогноз с большой заблаговременностью среднего месячного положения кромки льда на акваториях дальневосточных морей // Юбилейный выпуск ДВНИГМИ — 65 лет. — Владивосток : Дальнаука, 2015. — С. 124–143.

Анжина Г.И., Вражкин А.Н., Щербинина Т.П., Примачев Е.В. Автоматизированный метод прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей с заблаговременностью до одного года // Информационный сборник № 40. — М. ; Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2013. — С. 80–96.

Астахова Е.Д., Бундель А.Ю., Багров А.Н. и др. Система ансамблевого глобального прогноза метеорологических полей с заблаговременностью до 240 часов: результаты оперативных испытаний // Информационный сборник № 43. — М. ; Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2016. — С. 63–79.

Думанская И.О. Метод долгосрочного прогноза ледовых условий в Баренцевом море, Финском заливе и в северной части Каспийского моря, основанный на использовании статистического моделирования // Информационный сборник № 42. — М. ; Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2015. — С. 111–128.

Думанская И.О. Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях // Тр. Гидрометцентра России. — 2011а. — Вып. 345. — С. 74–93.

Думанская И.О. О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорол. и гидрол. — 2011б. — № 11. — С. 64–77.

Жежко Р.Я., Толмачева М.А. О способе выявления информативных предикторов // Тр. ДВНИГМИ. — 1990. — Вып. 136. — С. 110–118.

Каракаш А.И. Прогноз крупных аномалий ледовитости неарктических морей // Тр. Гидрометцентра СССР. — 1975. — Вып. 161. — С. 69–97.

Каракаш А.И., Короб М.И. О прогнозе ледовитости неарктических морей СССР // Тр. Гидрометцентра СССР. — 1988. — Вып. 292. — С. 118–123.

Каракаш А.И., Юсак Т. О долгосрочных ледовых прогнозах // Тр. ЦИП. — 1966. — Вып. 156. — С. 89–98.

Клячкин С.В., Гудкович З.М., Гузенко Р.Б., Май Р.И. Результаты испытания численной модели прогноза распределения льдов в юго-западной части Охотского моря заблаговременностью 1–5 суток // Информационный сборник № 42. — М. ; Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2015. — С. 66–82.

Муравьев А.В., Куликова И.А. Ансамбли прогнозов: методы, проблемы и перспективы // Метеорол. и гидрол. — 2005. — № 3. — С. 5–23.

Оганесян В.В. Долгосрочный прогноз ледовитости Аральского моря // Тр. Гидрометцентра СССР. — 1975. — Вып. 161. — С. 108–116.

Петров А.Г. Ледопродуктивность акватории Татарского пролива и осолонение вод в холодный период года // Тематический выпуск ДВНИГМИ № 3. — Владивосток : Дальнаука, 2000. — С. 133–138.

Петров А.Г. Некоторые особенности распространения холодного промежуточного слоя в Охотском море // Тр. ДВНИГМИ. — Л. : Гидрометеиздат, 1989. — Вып. 39. — С. 141–147.

Плотников В.В. Долгосрочный прогноз ледовитости Охотского моря с учетом крупномасштабных атмосферных процессов // Метеорол. и гидрол. — 1996. — № 12. — С. 93–100.

Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2002. — 167 с.

Плотников В.В. Состояние и перспективы развития методов ледовых прогнозов на морях Дальнего Востока // Метеорол. и гидрол. — 1985. — № 10. — С. 114–118.

Полякова А.М. К сверхдолгосрочному прогнозу ледовитости дальневосточных морей // Вестн. ДВО РАН. — 2012. — № 6. — С. 3–12.

Хан В.М., Крыжов В.Н., Вильфанд Р.М. и др. Мультимодельный подход при составлении прогнозов погоды на сезон // Метеорол. и гидрол. — 2011. — № 1. — С. 19–29.

Четырбоцкий А.Н., Плотников В.В. Ледяной покров Японского моря: анализ данных и моделирование : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2005. — 146 с.

Anzhina G.I., Vrazhkin A.N. Long-term forecast of the position of the ice edge in the Far Eastern seas // Asia-Pacific Journal of Marine Science&Education. — 2016. — Vol. 6, № 2. — P. 8–21.

Anzhina G.I., Vrazhkin A.N. Long-term forecasting Method of the ice cover in the Okhotsk sea using physical-statistical model // Pacific Oceanography. — 2008. — Vol. 4, № 1–2. — P. 45–49.

References

- Anzhina, G.I. and Vrazhkin, A.N.**, An ensemble approach to the long-term prediction of ice cover in the Bering Sea for 6 months ahead, in *DVNIGMI — 60 let* (The 60th Anniversary of the Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute), Vladivostok: Dal'nauka, 2010a, pp. 145–157.
- Anzhina, G.I. and Vrazhkin, A.N.**, Ice cover of the Sea of Japan and the method to forecast its average monthly values for a long time ahead, in *DVNIGMI — 60 let* (The 60th Anniversary of the Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute), Vladivostok: Dal'nauka, 2010b, pp. 134–144.
- Anzhina, G.I. and Vrazhkin, A.N.**, Visual interpretation of categorical forecasts of ice cover in the Far Eastern seas, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 2012, vol. 154, pp. 91–100.
- Anzhina, G.I. and Vrazhkin, A.N.**, A long lead-time prediction of the average monthly ice cover in the Far Eastern seas with details for decades *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 2017, vol. 155, pp. 141–156.
- Anzhina, G.I. and Vrazhkin, A.N.**, A background long lead-time forecast of the average monthly position of the ice edge in waters of the Far Eastern seas, in *Yubileinyi vypusk DVNIGMI — 65 let* (The 65th Anniversary of the Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Jubilee Issue), Vladivostok: Dal'nauka, 2015, pp. 124–143.
- Anzhina, G.I., Vrazhkin, A.N., Shcherbinina, T.P., and Primachev, E.V.**, An automated method for predicting the average monthly ice cover in the seas of Okhotsk, Japan, and in the Bering Sea for up to one year ahead, *Informatsionnyi sbornik N 40* (Information Collection no. 40), Obninsk: IG-SOTsIN, 2013, pp. 80–96.
- Astakhova, E.D., Bundel', A.Yu., Bagrov, A.N., Rozinkina, I.A., Ponomareva, T.Ya., Ruzanova, I.V., and Tsvetkov, V.I.**, A system of ensemble global forecast of meteorological fields for up to 240 hours ahead: results of operational tests, *Informatsionnyi sbornik N 43* (Information Collection no. 43), Obninsk: IG-SOTsIN, 2016, pp. 63–79.
- Dumanskaya, I.O.**, The method of long-term forecast of ice conditions in the Barents Sea, the Gulf of Finland, and the northern Caspian Sea, based on the use of statistical modeling, *Informatsionnyi sbornik N 42* (Information Collection no. 42), Obninsk: IG-SOTsIN, 2015, pp. 111–128.
- Dumanskaya, I.O.**, Method of long-term forecast of ice conditions in the White Sea and the Sea of Azov, *Tr. Gidrometeorol. Nauchno-Issled. Tsentra Ross. Fed.*, 2011a, vol. 345, pp. 74–93.
- Dumanskaya, I.O.** On the method of long-range forecasting of ice conditions in the European seas of Russia, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 11, pp. 747–757.
- Zhezhko, R.Ya. and Tolmacheva, M.A.**, On the method to reveal informative predictors, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 1990, vol. 136, pp. 110–118.
- Karakash, A.I.**, Prediction of large anomalies of ice cover in the non-Arctic seas, *Tr. Gidrometeorol. Nauchno-Issled. Tsentra SSSR*, 1975, vol. 161, pp. 69–97.
- Karakash, A.I. and Korob, M.I.**, On prediction of ice cover in the non-Arctic seas of the USSR, *Tr. Gidrometeorol. Nauchno-Issled. Tsentra SSSR*, 1988, vol. 292, pp. 118–123.
- Karakash, A.I. and Yushchak, T.**, On long-term ice forecasts, *Tr. Tsent. Inst. Prognozov*, 1966, vol. 156, pp. 89–98.
- Klyachkin, S.V., Gudkovich, Z.M., Guzenko, R.B., and Mai, R.I.**, The results of testing the numerical model to predict distribution of ice in the southwestern Sea of Okhotsk for 1–5 days ahead, *Informatsionnyi sbornik N 42* (Information Collection no. 42), Obninsk: IG-SOTsIN, 2015, pp. 66–82.
- Muraviev, A.V. and Kulikova, I.A.**, Forecast ensembles: Methods, problems, and prospects, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2005, no. 3, pp. 1–13.
- Oganesyan, V.V.**, Long-term forecast of ice cover in the Aral Sea, *Tr. Gidrometeorol. Nauchno-Issled. Tsentra SSSR*, 1975, vol. 161, pp. 108–116.
- Petrov, A.G.**, Ice productivity of the Tatar Strait water area and salinization of waters during the cold season, in *Tematicheskii vypusk DVNIGMI N 3* (Thematic Issue of the Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute no. 3), Vladivostok: Dal'nauka, 2000, pp. 133–138.
- Petrov, A.G.**, Some features of distribution of the cold intermediate layer in the Sea of Okhotsk, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 1989, vol. 39, pp. 141–147.
- Plotnikov, V.V.**, Long-term ice cover forecast for the Sea of Okhotsk with allowance for large-scale atmospheric processes, *Meteorol. Hydrol.*, 1996, no. 12, pp. 93–100.
- Plotnikov, V.V.**, *Izmenchivost' ledovykh uslovii dal'nevostochnykh morei Rossii i ikh prognoz* (Variability of Ice Conditions in the Far Eastern Seas of Russia and Prediction of Them), Vladivostok: Dal'nauka, 2002.
- Plotnikov, V.V.**, The state and prospects of the development of methods for ice forecasts in the Far Eastern seas, *Meteorol. Hydrol.*, 1985, no. 10, pp. 114–118.

Polyakova, A.M., On superlong-term forecasts of the Far East seas ice extent, *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2012, no. 6, pp. 3–12.

Khan, V.M., Kryzhov, V.N., Vil'fand, R.M., Tishchenko, V.A., and Bundel', A.Y., Multimodel approach to seasonal prediction, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36. no. 1, pp. 11–17.

Chetyrbotsky, A.N. and Plotnikov, V.V., *Ledyanoi pokrov Yaponskogo morya: analiz dannykh i modelirovaniye* (Ice Cover in the Sea of Japan: Data Analysis and Modeling), Vladivostok: Dal'nauka, 2005.

Anzhina, G.I. and Vrazhkin, A.N., Long-term forecast of the position of the ice edge in the Far Eastern seas, *Asia–Pac. J. Mar. Sci. Educ.*, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 8–21.

Anzhina, G.I. and Vrazhkin, A.N., Long-term forecasting method of the ice cover in the Okhotsk sea using physical-statistical model, *Pac. Oceanogr.*, 2008, vol. 4, no. 1–2, pp. 45–49.

Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. T. 9: Okhotskoye more (Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas, vol. 9: Sea of Okhotsk), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1998, no. 1.

Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. T. 10: Beringovo more (Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas, vol. 10: Bering Sea), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1999, no. 1.

Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. T. 8: Yaponskoye more (Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas, vol. 8: Sea of Japan), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003, no. 1.

Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3, ch. 3: Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov (Instruction on the Forecast Service. Section 3, Part 3. Marine Hydrological Forecast Service), Moscow: Triada, 2011.

Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov: RD 52.27.284-91: vvod v deystvie s 01.01.92 (Methodical Guidelines. Conducting Operational Tests of New and Improved Methods of Hydrometeorological and Heliogeophysical Forecasts: RD 52.27.284-91: Commissioning from January 01, 1992), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1991.

Поступила в редакцию 21.06.18 г.

Принята в печать 13.07.18 г.