

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗА СРЕДНЕЙ МЕСЯЧНОЙ ЛЕДОВИТОСТИ ОХОТСКОГО, ЯПОНСКОГО И БЕРИНГОВА МОРЕЙ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО ОДНОГО ГОДА

В Приморском УГМС, в соответствии с «Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета», в период с июня 2008 по июнь 2011 г. проводились оперативные испытания автоматизированного метода прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей с заблаговременностью более 7 месяцев. Этот метод разработан в отделе долгосрочных прогнозов погоды и изучения климата ФГБУ «ДВНИГМИ» в период с 2005 по 2008 год.

Ледовитость моря рассчитывалась как отношение общей площади льда к площади расчетной сетки на акватории моря, выраженное в процентах. Расчетная сетка, определяющая границы возможного формирования ледового покрова, занимает в Охотском и Беринговом морях всю акваторию, в Японском море – Татарский пролив, залив Петра Великого и прибрежную зону Российской Федерации [3–5].

Прогнозы рассчитывались на месяцы с наиболее устойчивым ледовым покровом: в Охотском и Беринговом морях – с декабря по май, в Японском море – с декабря по апрель.

Исходные данные и основы метода прогноза

Современные способы прогноза ледовых характеристик основываются на представлении о взаимодействии океана, ледового покрова и атмосферы как единой системы с множеством прямых и обратных связей. Особое внимание при долгосрочном прогнозировании уделяется наличию в атмосфере «дальних связей» (в пространстве и времени). Поэтому при проведении исследований исходные данные полей метеопараметров выбирались в Северном полушарии, а также привлекалась информация из Южного полушария. При выборе полей руководствовались тем, чтобы метеопараметры, характеризующие термодинамические процессы в атмосфере, не только достаточно полно отражали ледовые условия на морях, но и могли использоваться для их предсказания. Термические характеристики воздуха опосредованно могут служить количественными показателями теплосодержания океана.

Таким образом, при разработке метода долгосрочного прогноза ледовитости дальневосточных морей использовался следующий набор исходных данных полей метеопараметров: геопотенциал на уровне 500 гПа; давление, приведенное к уровню моря; температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа; температура поверхности Земли; поле относительной топографии $OT_{500/1000}$, а также индекс SOI (стандартизованная разность значений давления на станциях «Таити» и «Дарвин»); ледовитость моря.

Источником информации для получения упомянутых полей послужили 4-срочные архивы NCEP/NCAR в формате GRIB на сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (http://nomad2.ncep.noaa.gov/cgi-bin/ftp2u_6p_r1.sh). По этим данным проводилось осреднение и расчет среднемесячных значений в узлах сетки. Значения SOI, интегральной характеристики Южного колебания, получены из (<ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/>).

Архивы по ледовитости моря сформированы с привлечением:

– данных декадной и среднемесячной ледовитости по сведениям ледовых авиаразведок, содержащихся в архивах ФГБУ «ДВНИГМИ»;

– данных по модельной сплочённости льда NCEP в формате GRIB (<ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/ice>) (разрешение сетки $1^\circ \times 1^\circ$ и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$);

– Arctic Sea Ice Atlas Национального ледового центра США (NIC) в формате EASE-Grid (<http://nsidc.org>).

В результате обработки упомянутой информации получены поля сплочённости льда разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Климатические значения (нормы) и средние квадратические отклонения (σ) от нормы для всех параметров рассчитаны для каждого месяца по 30-летнему базовому периоду, рекомендованному ВМО (1971–2000 гг.). Норма и σ для SOI определены по базовому периоду 1951–1980 гг.

Объем выборки изменялся в зависимости от срока составления прогноза. Для проведения расчетов значения предикторов приводились к стандартному виду.

Описание прогностического алгоритма

Метод долгосрочного прогноза ледовитости дальневосточных морей базируется на модели, разработанной на физико-статистической основе. Описание алгоритма построения прогностической модели на месяцы ледового сезона представлено в [1, 2, 10]. Его основные составляющие следующие:

- поиск и формирование рядов предикторов;
- расчет будущих значений предиктанта;

– отбор прогностической модели и выдача результатов прогноза.

Поиск и формирование рядов предикторов. Для поиска предикторов используется способ их выявления в полях гидрометеопараметров, изложенный в [6]. Предлагается следующая последовательность действий для диагностики статистических связей между предиктантом и множеством предикторов:

- 1) разбиение выборки предиктанта на три класса;
- 2) отнесение элементов выборки предиктора к соответствующему классу предиктанта;
- 3) выявление в определенном классе статистических взаимосвязей между предиктантом и предиктором и нахождение степени различия между полученными классами.

Следуя [6], метод поиска предикторов в полях гидрометеопараметров, применительно к прогнозу средней месячной ледовитости моря (предиктант), состоит в следующем. Многолетний ряд отклонений ледовитости от нормы (анЛ) для данного месяца делится на три группы случаев: меньше нормы ($\text{анЛ} < -0,674\sigma$), больше нормы ($\text{анЛ} > 0,674\sigma$) и близкие к норме ($|\text{анЛ}| \leq 0,674\sigma$). Каждому расчетному классу ледовитости ставится в соответствие набор предикторов. В качестве потенциальных предикторов выступают значения гидрометеопараметров в узлах сетки на пространстве Северного полушария. Поля выбираются в предшествующие прогнозу месяцы. Далее этот набор предикторов анализируется на степень информативности. Для определения уровня информативности принималось следующее правило: соответствие между значениями ледовитости и предиктора тем больше, чем выше межклассовые различия и чем более устойчивы выбранные классы.

Для упрощения диагностики массивов ледовитости и полей гидрометеопараметров используется процедура определения однородности классов по знаку аномалии предиктора.

Для этого рассчитывается величина $P_i = 100 \frac{n_{i+}}{N_i}$, где n_{i+} – число случаев в i -й точке (узле

сетки) с положительной аномалией; N_i – общее число случаев, вошедших в данный класс.

Если $P_i \geq 60\%$, то преобладают положительные аномалии предиктора, если $P_i \leq 40\%$ – отрицательные. Выделяются «прямые» и «обратные» связи предиктанта с предиктором.

Связь названа:

– «прямая», если большой повторяемости положительного знака аномалии предиктора в классе ледовитости «больше нормы» соответствует большая повторяемость отрицательного знака аномалий предиктора в классе ледовитости «меньше нормы»;

– «обратная», если большой повторяемости отрицательного знака аномалий предиктора в классе ледовитости «больше нормы» соответствует большая повторяемость положительного знака в классе ледовитости «меньше нормы».

Наиболее полезную для прогнозов информацию содержат те узлы поля гидрометеопараметра, в которых отмечаются наибольшие значения расстояний между классами.

Если в набор исходных данных входят одновременно несколько полей, то информативными могут оказаться десятки предикторов. Поэтому разработан алгоритм осреднения значений предикторов по районам. В район может быть включено два и более близлежащих информативных предиктора.

В алгоритме применен динамический принцип формирования рядов предикторов. Это позволяет использовать разнородную информацию, задаваемую как в виде полей, так и в виде временных рядов. Такие предикторы, как ледовитость моря и индекс SOI, представлены временными рядами.

Расчет будущих значений ледовитости. Прогностические значения ледовитости в модели могут быть получены двумя способами:

– в результате составления и решения уравнения множественной линейной регрессии (метод регрессионный);

– путем выявления лет-аналогов по предикторам и расчета ледовитости по некоторому правилу.

Использование аналогов позволяет, хотя и опосредованно, более полно учесть местные условия рассматриваемой акватории. Степень аналогии атмосферных процессов устанавливается следующим образом. В исходном для прогноза месяце (определяемом заблаговременностью прогноза) рассчитываются аномалии всех предикторов (исходная реализация). Затем оценивается мера различия между исходной реализацией и реализациями из архивов в этом же месяце. В качестве метрики использовано евклидово расстояние, которое рассчитывается по совокупности предикторов. Выбирается группа лет-аналогов с высокой степенью сходства с исходной реализацией (по минимуму метрики). Осредненное по отобранной группе аналогов значение предиктанта предлагается в качестве прогностического. В свою очередь, метод аналогов использовался в двух вариантах, отличающихся набором предикторов, по которым аналог находится. В первом варианте в анализ включались все предикторы («метод аналоговый»), во втором – только те, которые входили в построенное ранее уравнение регрессии («метод регрессионно-аналоговый»).

Отбор прогностической модели. Для создания метода долгосрочного прогноза ледовитости требовалось построить прогностическую модель, наиболее адекватно отражающую ледовую обстановку в море. Для этого проводились вычислительные эксперименты по разным наборам данных (использовались сочетания всех перечисленных выше гидрометеопараметров), разным заблаговременностям (исследовались асинхронные связи со сдвигом в 7 месяцев и более) и разным способам расчета значений ледовитости. В экспериментах применялась адаптивная (с добавлением в архивы исходных данных, используемых для осуществления прогноза) схема расчетов.

Расчет оценок производился согласно Наставлению [9] и Методическим указаниям [8].

Качество прогностической модели оценивалось по значению оправдываемости прогнозов (P, %). Оценка осуществлялась на материалах семилетней проверочной выборки (2001/2002 – 2007/2008 гг.). Варианты моделей отбирались (в режиме визуального просмотра результатов оценки) исходя из максимальной оправдываемости прогнозов.

Единой физико-статистической прогностической модели для всех месяцев ледового сезона на акватории конкретного моря создать не удалось. Вычислительные эксперименты показали, что для каждого месяца выявляется несколько вариантов модели с оправдываемостью прогнозов ледовитости на независимой выборке не менее 70 %.

Первоначально предпочтение отдавалось тем из прогностических моделей, которые при одинаковом качестве прогноза ледовитости требовали минимальных трудозатрат при подготовке исходной информации. Для проведения оперативных испытаний для Охотского и Японского морей были отобраны модели, где в число исходных данных входили: ледовитость моря, индекс SOI, поля геопотенциала на уровне 500 гПа и давления на уровне моря. Но одновременно испытывались модели, где помимо предикторов барических полей использовались предикторы термических полей: температуры воздуха на уровне 850 гПа, относительной топографии $OT_{500/1000}$, температуры поверхности Земли. В дальнейшем изложении метод расчета прогностических значений ледовитости по первому набору моделей будем называть мет1, а по второму – мет2. При этом заблаговременность прогнозов в наборе моделей мет2 больше, чем в мет1. Для Берингова моря в обоих наборах использовались указанные выше термобарические поля.

Технологическая линия

Технологическая линия (рис. 1) оперативного прогноза ледовитости включает следующие блоки:

– формирование баз данных 4-х срочных метеорологических наблюдений и данных по сплочённости льда;

– обработка оперативных архивов и создание наборов среднемесячных величин, используемых для расчетов;

– прогностический блок, включающий выдачу результатов прогноза.

Первый блок функционирует в едином комплексе уже действующих моделей и технологий оперативных морских прогнозов. Второй блок технологической линии дополнительно подключен в систему первого и является общим для трех морей. Третий блок подготовлен для каждого из морей в отдельности.

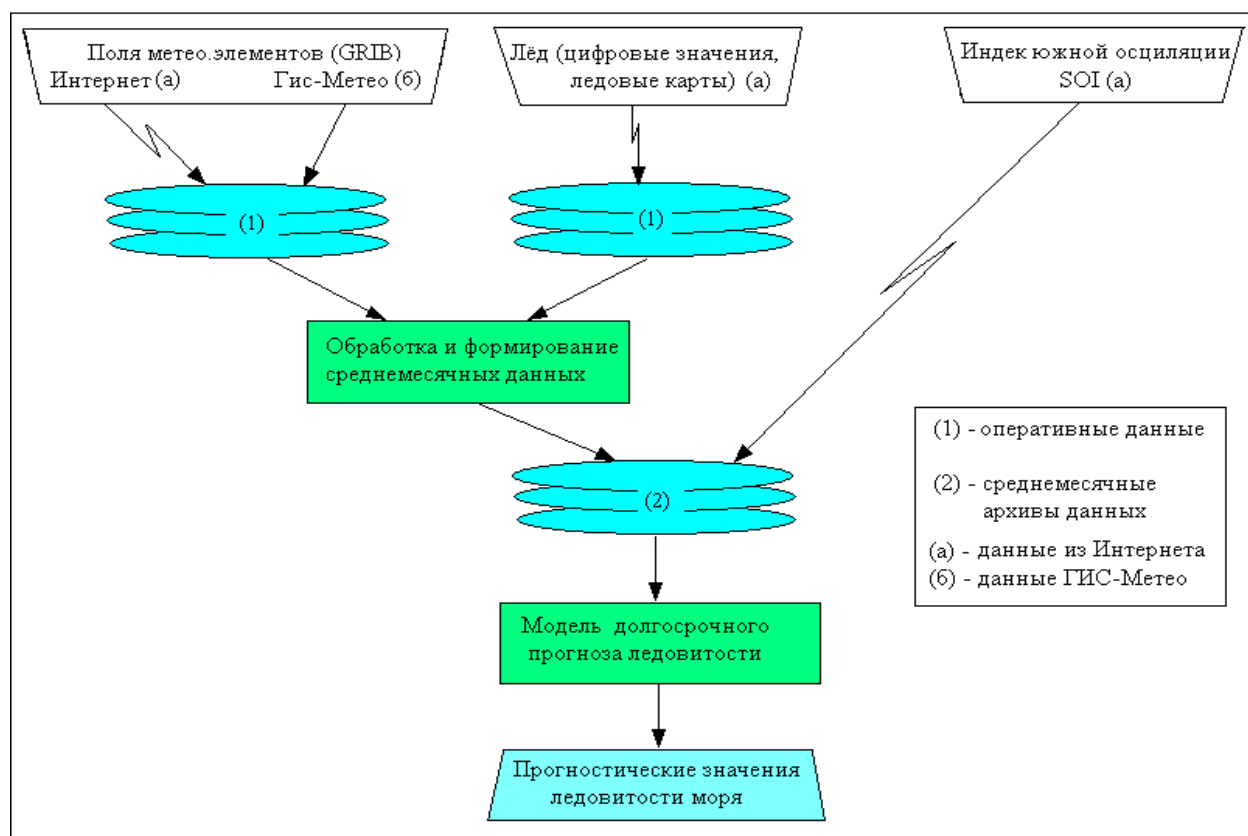


Рис. 1. Общая схема линии долгосрочного прогноза ледовитости моря.

Программный комплекс, реализующий прогностический блок, содержит архивы перечисленных выше полей метеопараметров, архивы средних месячных значений этих полей и их стандартных отклонений, файлы с данными ледовитости и индекса SOI, а также блок расчета будущих значений ледовитости моря.

Входным параметром служит год прогноза, определяемый по году начала ледового сезона (декабрь). Результатом расчетов являются прогностические значения ледовитости моря.

Результаты испытаний прогнозов ледовитости и сравнение их с результатами прогнозов другими методами

Сравнение результатов прогнозов предложенным методом и другими методами вызывает определенные трудности.

Несмотря на то, что методы прогноза ледовых условий на дальневосточных морях разрабатываются в ФГБУ «ДВНИГМИ» с конца 70-х годов прошлого века [7], к сожалению, в оперативной практике они активно не используются из-за недостаточной автоматизации процесса подготовки прогноза.

В настоящее время ежегодно составляются официальные прогнозы ледовых условий для арктических морей России, в том числе для дальневосточных морей. Они помещаются в Гидрометеорологический бюллетень ФГБУ «Гидрометцентр России». Однако провести корректное сравнение методических и официальных прогнозов не представляется возможным, поскольку в официальных прогнозах ледовитости указываются две ее характеристики: наибольшее значение ледовитости за месяц и ледовитость во 2-ой декаде, а в методических – только средняя за месяц величина.

Тем не менее, для примера было проведено качественное сравнение представленных в бюллетене и методических прогнозов средней месячной ледовитости на акватории Охотского моря за два ледовых сезона: 2008/2009–2009/2010 гг. (табл. 1). Для этого из методических прогнозов ледовитости на все месяцы ледового сезона отобран месяц с максимальной ледовитостью. В табл. 1 также помещены значения максимальной за сезон фактической средней месячной ледовитости, многолетней средней величины ледовитости, взятой из Бюллетеня (числитель), и рассчитанной авторами метода по данным за период 1971–2000 гг. (знаменатель).

Месяц наибольшей ледовитости в ледовый сезон 2008/2009 гг. во всех прогнозах спрогнозировано верно, но величина ледовитости завышена значительно. Прогноз можно считать неудачным по всем методам. Успешными как по месяцу максимальной ледовитости, так и по ее величине, оказались прогнозы максимальной ледовитости на сезон 2009/2010 гг. Таким образом, результаты методических прогнозов ледовитости на зиму можно считать сопоставимыми с официальными прогнозами. При этом методические прогнозы даются с большей заблаговременностью.

Количественное же сравнение проводилось только между методическим и стандартным (климатологическим) прогнозами.

Осредненные за три года оперативных испытаний оправдываемости методических (мет1, мет2) и климатологических (клим) прогнозов по каждому из дальневосточных морей и каждому месяцу ледового сезона приведены в табл. 2.

Таблица 1

Долгосрочный прогноз (официальный, методический, климатологический) максимальной ледовитости (махЛ, %) Охотского моря, ледовые сезоны 2008/2009–2009/2010 гг.

Способ прогноза	Прогноз			Факт	
	дата составления	махЛ	месяц махЛ	махЛ	месяц махЛ
Период прогноза 2008/2009 гг.					
Официальный	30.09.2008	70-80	III	57	III
Методический	06.2008	82	III	57	III
Климатологический		78/75	III	57	III
Период прогноза 2009/2010 гг.					
Официальный	03.10.2009	70-80	III	74	III
Методический	06.2009	71	III	74	III
Климатологический		75/75	III	74	III

Таблица 2

Средняя за период оперативных испытаний 2008/2009–2010/2011 гг. оправдываемость (Р%) методических (мет1, мет2) и климатологических (клим) прогнозов средней месячной ледовитости дальневосточных морей

Месяц прогноза	Охотское море			Японское море			Берингово море		
	клим	мет1	мет2	клим	мет1	мет2	клим	мет1	мет2
Декабрь	33,3	100	100	100	100	100	66,7	33,3	100
Январь	0	33,3	100	0	100	100	0	100	66,7
Февраль	33,3	66,7	100	33,3	100	100	0	100	33,3
Март	33,3	66,7	66,7	66,7	100	100	66,7	33,3	66,7
Апрель	66,7	33,3	66,7	100	100	66,7	33,3	33,3	66,7
Май	100	33,3	66,7	–	–	–	33,3	0	33,3

В Охотском море преимущество имеют прогнозы ледовитости по мет2, которые с декабря по февраль оправдались на 100 % и с марта по май – на 67 %. Из прогнозов ледовитости, осуществленных по мет1, самыми неудачными (P=33 %) оказались прогнозы на январь, апрель и май, а самыми успешными (100 %) – на декабрь. Из общего числа прогнозов (18) по мет1 за период испытаний не оправдалось (P = 0 %) 8 прогнозов, причем в пяти из них не предсказаны значительные (больше σ) аномалии ледовитости, а из прогнозов по мет2 не оправдались только три прогноза (2010 г., март–май).

В среднем за 3 года оправдываемость методических прогнозов ледовитости Японского моря по моделям как первого, так и второго наборов, оказалась успешной. Только в апреле

оправдываемость, в отличие от других месяцев ($P=100\%$), по мет2 составила 67 %. При этом все случаи (январь 2009, 2010 и 2011 г., февраль 2010 и 2011 г., март 2009 г.) аномалии ледовитости больше σ предсказаны.

Прогнозы ледовитости по акватории Берингова моря оказались менее успешными. Самыми неудачными одновременно по мет1 и мет2 были прогнозы на май (0 и 33 % соответственно). Однако из 12 аномалий ледовитости, превосходящих по величине σ , только три аномалии (больше $1,5\sigma$) не были предсказаны в прогнозах ни по одной из двух моделей.

Оценки климатологических прогнозов свидетельствуют о том, что оперативные испытания методов прогноза среднемесячной ледовитости дальневосточных морей проходили в сезоны, отличавшиеся аномальным развитием ледовых условий. Кроме того следует отметить, что климатологические прогнозы средней месячной ледовитости последнего месяца периода ледовитости Охотского и Японского морей точнее методических.

Для иллюстрации сказанного на рис. 2 приведен график стандартизованных значений фактических среднемесячных аномалий ледовитости дальневосточных морей за период оперативных испытаний (2008/2009 – 2010/2011 гг.).

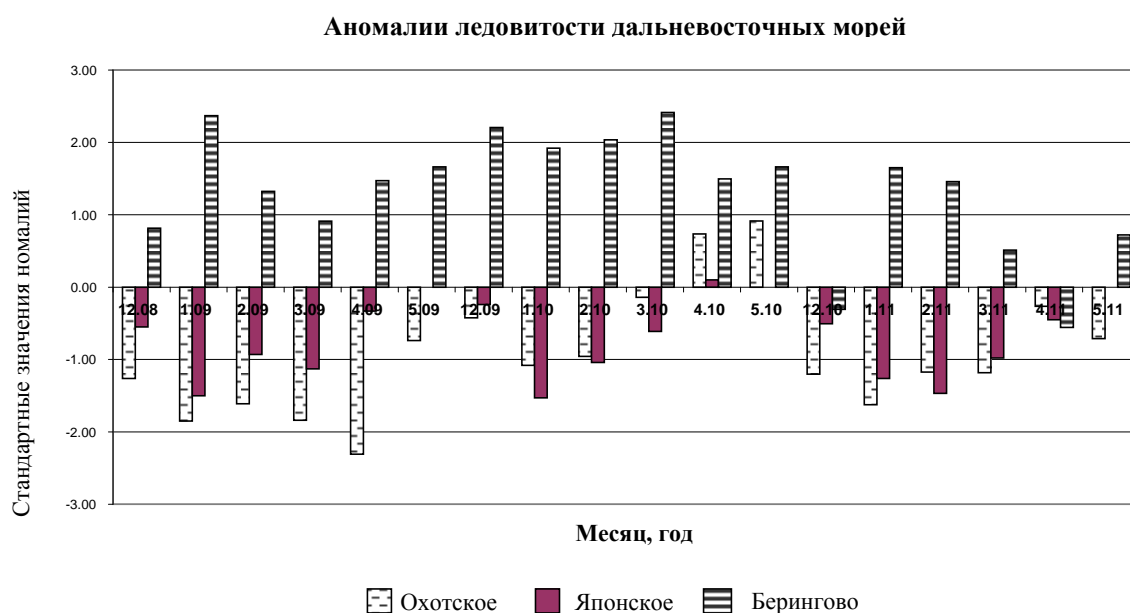


Рис. 2. Фактические аномалии ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей за период 2008/2009-2010/2011 гг.

Сезон 2008/2009 гг. характеризовался значительными аномалиями ледовитости на акваториях всех дальневосточных морей. В Охотском и Японском морях они были меньше нормы, а в Беринговом – больше нормы. При этом в Охотском море только в мае аномалии

составили $0,7\sigma$, а от декабря к апрелю они изменялись от $1,3\sigma$ до $2,3\sigma$. В апреле 2009 г. почти на 7 % был уменьшен абсолютный минимум ледовитости 2005 г., составлявший 37 %. Аномалии ледовитости в Японском море были меньше по величине. Положительные аномалии ледовитости, наблюдавшиеся в Беринговом море, в декабре и марте были близки к σ , а в остальные месяцы – больше σ .

В сезоне 2009/2010 гг. в Охотском и Японском морях в первые четыре месяца также отмечались отрицательные аномалии ледовитости, но в апреле знак аномалии изменился на противоположный. В мае на акватории Охотского моря величина положительной аномалии составила $0,92\sigma$. В Беринговом море в течение ледового сезона отмечались положительные аномалии, превышающие $1,5\sigma$.

В сезон 2010/2011 гг. на всех трех морях также наблюдались аномалии ледовитости, превышающие σ . В Охотском море такие аномалии прослеживались с декабря по март, а в Японском и Беринговом морях – с января по февраль.

Для более детального анализа оправдываемости прогнозов по каждому из трех сезонов обратимся к наиболее часто употребляемому показателю качества прогнозов [7]: $|\Delta I| = |P - \Phi|$ – абсолютная ошибка прогноза, где P (Φ) – прогностическое (фактическое) значение ледовитости. Полученные результаты оценки прогнозов представлены в табл. 3, где ΔI_k , ΔI_1 и ΔI_2 обозначают абсолютные ошибки климатологического и методических (мет1, мет2) прогнозов соответственно. Для удобства анализа приводится абсолютная величина допустимой ошибки прогнозов. Для прогнозов заблаговременностью более 6 месяцев допустимая погрешность составляет $\pm\sigma$ (σ – среднеквадратическое отклонение от нормы среднемесячной ледовитости).

По акватории Охотского моря максимально большие абсолютные ошибки климатологических прогнозов ледовитости, осредненные за 3-летний период испытаний, наблюдались в январе ($1,5\sigma$), а минимальные – в мае ($0,8\sigma$). В декабре значение ΔI_k составило $0,96\sigma$, а с февраля по апрель превысило σ . Средние же абсолютные ошибки методических прогнозов, превышающие σ , отмечались по обеим моделям (мет1 – $1,42\sigma$, а мет2 – $1,16\sigma$) только в апреле, а в феврале - в прогнозах по модели из первого набора ($1,04\sigma$). При сравнении результатов прогноза по двум наборам моделей очевидное преимущество с января по май имеют прогностические модели из второго набора. В декабре же ошибки прогнозов по модели из первого набора меньше.

В Японском море как по оправдываемости, так и по величине абсолютной ошибки прогноза только в апреле предпочтение следует отдать модели из первого набора. В остальные месяцы прогнозы находятся на одном уровне по величине оправдываемости (100 %) и несущественно отличаются по абсолютной ошибке. При этом значения ΔI_k с

января по март больше $\Delta L1$ и $\Delta L2$ в 3–4 раза. В декабре абсолютные ошибки климатологического и методического (по мет1) прогнозов близки по величине.

Осредненные за 3 года абсолютные ошибки климатологических прогнозов ледовитости по акватории Берингова моря в каждом из шести месяцев ледового сезона были больше величины среднего квадратического отклонения для этих месяцев. Максимальная величина ΔLk наблюдалась в январе ($1,98\sigma$), а минимальная ($1,09\sigma$) – в апреле. В прогнозах лучшей по качеству модели для каждого месяца величина абсолютной ошибки была меньше абсолютной ошибки климатологического прогноза. При этом только в мае абсолютная ошибка методического прогноза (по мет2) составила $1,21\sigma$, а в остальные месяцы она была меньше или близка к σ .

Таблица 3

Допустимая (σ) и абсолютная ошибки (%) методических (мет1- $\Delta L1$, мет2- $\Delta L2$) и климатологического (ΔLk) прогнозов ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей на месяцы ледовых сезонов за период оперативных испытаний 2008/2009–2010/2011 гг.

Месяц	σ	Период оценки											
		2008/2009			2009/2010			2010/2011			2008/2009–2010/2011		
		ΔLk	$\Delta L1$	$\Delta L2$	ΔLk	$\Delta L1$	$\Delta L2$	ΔLk	$\Delta L1$	$\Delta L2$	ΔLk	$\Delta L1$	$\Delta L2$
Охотское море													
XII	8,49	10,7	3,4	7,5	3,6	4,8	4,3	10,2	0	3,8	8,17	2,73	5,2
I	11,4	21,1	12	10,9	12,3	1,2	2,6	18,5	20,6	8,2	17,3	11,27	7,23
II	11,42	18,4	23,4	0,6	10,9	6,8	1,6	13,4	5,3	3,6	14,23	11,83	1,93
III	9,9	18,2	25,2	0,9	1,4	3,0	13,1	11,7	0,6	0,9	10,43	9,6	4,97
IV	11,7	27,0	14,7	11,4	8,6	27,2	19,8	3,1	7,8	9,7	12,9	16,57	13,63
V	8,3	6,1	10,2	0,2	7,6	11,3	15,1	5,9	1,9	1,5	6,53	7,8	5,6
Японское море													
XII	6,7	3,7	2,1	0,1	1,6	5,0	1,1	3,4	2,5	1,5	2,9	3,2	0,9
I	8,8	13,2	7,1	6,3	13,4	1,8	4,9	11,1	1,0	1,7	12,57	3,3	4,3
II	9,0	8,4	1,3	5,2	9,4	1,4	1,2	11,4	5,2	0,7	9,73	2,63	2,37
III	9,2	10,4	3,7	1,9	5,6	2,1	5,5	9,0	1,6	0,7	8,33	2,47	2,7
IV	4,9	1,6	1,5	0,8	0,5	2,2	4,9	2,2	4,7	11,2	1,43	2,8	5,63
Берингово море													
XII	5,53	4,5	4,1	0,7	12,2	8,1	4,8	1,7	8,4	4,8	6,13	6,87	3,43
I	5,99	14,2	5,8	4,3	11,5	5,3	0,2	9,9	5,7	7,4	11,87	5,6	3,97
II	5,21	6,9	2,2	2,5	10,6	4,0	7,0	7,6	2,7	6,8	8,37	2,97	5,43
III	5,47	5,0	3,5	4,5	13,2	10,8	10,5	2,8	6,4	2,1	7,0	6,9	5,7
IV	8,09	11,9	7,9	7,0	12,1	10,9	15,4	4,5	9,5	2,1	8,83	9,43	8,17
V	7,76	12,9	16,2	9,9	12,9	9,4	6,5	5,6	8,5	11,8	10,47	11,37	9,4

Сравнительный анализ оценок климатологических (клим) и методических (мет1 и мет2) прогнозов указывает на эффективность использования методических прогнозов ледовитости. Приведенные в табл. 4 осредненные за периоды авторских и оперативных испытаний характеристики качества прогнозов подтверждают это.

Результаты испытаний метода долгосрочного прогноза средней месячной ледовитости дальневосточных морей за месяцы ледового сезона в периоды авторских (2001/02–2007/08 гг.) и оперативных (2008/2009–2010/2011 гг.) испытаний

Море	Период оценки, гг.	Кол-во составлен. прогнозов	Число оправдавшихся прогнозов			Оправдываемость, %		
			клим	мет1	мет2	клим	мет1	мет2
Охотское	2001/02-2007/08	42	24	37	40	57	88	95
	2008/09-2010/11	18	8	10	15	44	56	83
Японское	2001/02-2007/08	35	15	30	30	43	86	86
	2008/09-2010/11	15	9	15	14	60	100	93
Берингово	2001/02-2007/08	42	29	37	36	69	88	86
	2008/09-2010/11	18	6	9	11	33	50	61

Число оправдавшихся методических прогнозов, как в период авторских испытаний, так и за годы оперативных испытаний, превосходит количество оправдавшихся климатологических прогнозов.

Величина оправдываемости методических прогнозов на акваториях дальневосточных морей, рассчитанная по семилетней независимой выборке, изменялась от 86 до 95 %, а климатологических – от 33 до 69 %. Трехлетние оперативные испытания в целом подтвердили выводы, сделанные на основе авторских испытаний. Хотя оправдываемость прогнозов ледовитости на акваториях Охотского и Берингова морей понизилась в период оперативных испытаний, но их преимущество по отношению к климатологическим прогнозам остается очевидным. Эффективность прогнозов значительно понизилась только при использовании мет1 в Охотском море (с 31 до 12 %). В Японском море она уменьшилась с 43 до 33 % в случае использования мет2 и до 40 % – мет1. В Беринговом море за годы оперативных испытаний при использовании мет2 оправдываемость прогнозов уменьшилась, но их эффективность увеличилась с 17 до 28 %.

Для характеристики надежности прогнозов была рассчитана мера мастерства по формуле [8]:

$$S = \frac{U - U_0}{U_u - U_0},$$

где U и U_0 – любые из показателей успешности методических и климатологического прогнозов; U_u – успешность идеального прогноза. Для идеальных прогнозов мера мастерства $S = 1$, при $S = 0$ качество методического прогноза находится на уровне стандартного и при $S < 0$ – ниже стандартного прогноза. Эта характеристика рассчитана для средней за 3 года абсолютной ошибки прогноза. В случае идеального прогноза $|\Delta L| = 0$.

Анализ значений меры надежности S (табл. 5) показывает, что отрицательной одновременно для моделей из первого и второго наборов эта характеристика оказалась только в апреле для прогнозов ледовитости по Охотскому и Японскому морям. При этом в Охотском море фактическая аномалия, не превосходящая σ , была неудачно предсказана по обоим моделям в 2010 г. В Японском море не оправдался только прогноз на апрель 2011 г. по мет2. Однако средние за 3-летие абсолютные ошибки методического прогноза на апрель оказались больше аналогичных ошибок климатологического прогноза.

Таблица 5

Характеристика надежности (S) методических (мет1, мет2) прогнозов средней месячной ледовитости дальневосточных морей, рассчитанная по средней абсолютной ошибке прогнозов за период оперативных испытаний 2008/2009–2010/2011 гг.

Море	Вариант расчетов	Месяц					
		Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
Охотское	мет1	0,666	0,349	0,169	0,167	-0,284	-0,194
	мет2	0,364	0,582	0,864	0,523	-0,057	0,142
Японское	мет1	-0,103	0,737	0,730	0,704	-0,958	-
	мет2	0,690	0,658	0,756	0,676	-2,937	-
Берингово	мет1	-0,121	0,528	0,646	0,014	-0,068	-0,086
	мет2	0,440	0,666	0,351	0,186	0,075	0,102

На основании результатов оперативных испытаний для долгосрочного прогноза ледовитости на дальневосточных морях были сформированы комбинированные наборы моделей с наиболее высокими оценками качества прогнозов. Оправдываемость прогнозов по комбинированному набору моделей за период оперативных испытаний приведена в табл. 6. Средняя за сезон оправдываемость прогнозов по этим наборам моделей за период испытаний превзошла 77 %. Эффективность прогнозов для Охотского моря составила 39 %, для Японского моря – 40 %, для Берингова моря – 44 %.

Таблица 6

Средняя оправдываемость (%) прогнозов средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей (комбинированный набор моделей) за 3-летний период (2008/2009-2010/2011 гг.)

Море	Оправдываемость, %						
	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Средняя за сезон
Охотское	100	100	100	66,7	66,7	66,7	83,3
Японское	100	100	100	100	100	-	100
Берингово	100	100	100	66,7	66,7	33,3	77,8

В дальнейшем по этим наборам можно осуществлять прогнозирование в оперативном режиме. Расчет значений средней месячной ледовитости на акваториях Охотского, Японского и Берингова морей в наступающем сезоне может быть произведен в июле. К этому времени должны быть подготовлены необходимые оперативные данные по июнь включительно.

На основании вышеизложенного можно заключить, что метод долгосрочного прогноза ледовитости имеет практическую значимость для оперативной практики прогнозирования на дальневосточных морях. Метод удобен в работе. Составление прогноза занимает несколько минут (без учета затрат времени на подготовку данных).

Рекомендации о внедрении

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП) в своем решении от 6 февраля 2012 г. одобрила работу ФГБУ «ДВНИГМИ» по разработке автоматизированных методов прогноза средней месячной ледовитости дальневосточных морей. ЦМКП считает необходимым:

- внедрить метод прогноза средней месячной ледовитости Охотского, Японского и Берингова морей в оперативную практику ФГБУ «ДВНИГМИ»;
- рекомендовать прогностическим подразделениям Росгидромета, занимающимся обеспечением потребителей ледовой информацией, использовать выходную продукцию внедренного метода в практической работе.

Список литературы

1. Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Ансамблевый подход к долгосрочному прогнозу ледовитости Берингова моря с заблаговременностью более 6 месяцев // Труды ДВНИГМИ. Юбилейный выпуск «ДВНИГМИ - 60 лет». – 2010. – С. 145–157.
2. Анжина Г.И., Вражкин А.Н. Ледовитость Японского моря и метод прогноза ее средних месячных значений с большой заблаговременностью // Труды ДВНИГМИ. Юбилейный выпуск «ДВНИГМИ – 60 лет». – 2010. – С. 134–144.
3. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей. Том X. Берингово море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. – 300 с.
4. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей. Том IX. Охотское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. – 342 с.
5. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей. Том VIII. Японское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. – 398 с.
6. Жежко Р.Я., Толмачева М.А. О способе выявления информативных предикторов // Труды ДВНИГМИ. – 1990. – Вып. 136. – С. 110–118.

7. *Плотников В.В.* Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 172 с.

8. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 150 с.

9. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада, лтд, 2011. – 201 с.

10. 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, No. 1–2. – P. 45–49.