

МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ДРЕЙФА ЛЬДА В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ

Л.Н. ДЫМЕНТ, С.М. ЛОСЕВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: ldyment@yandex.ru

По данным автоматических буев «Аргос» за годовые ледовые циклы рассчитана повторяемость месячных полей скорости дрейфа льда с наличием в каждом из них антициклонического вихревого образования. Установлено, что при близких значениях повторяемости за разные годы поля скорости дрейфа также во многом идентичны друг другу. На этом основании совокупность лет с исходными данными по величине повторяемости разделена на 3 группы. Прогностический расчет перемещения льда выполняется по месячным полям той из них, значения повторяемости которой будут, как ожидается, в большей мере соответствовать повторяемости текущего годового ледового цикла. Приведена информация, на основании которой осуществляется выбор аналоговой группы лет. Изложена технология прогностического расчета перемещения льда по месячным полям скорости дрейфа за выбранные аналоговые годы. Представлены результаты определения оправдываемости и эффективности метода, полученные с учетом эллипса допустимой погрешности.

Ключевые слова: поля скорости дрейфа льда, антициклонические вихревые образования, прогностический расчет дрейфа льда, эллипс допустимой погрешности.

ВВЕДЕНИЕ

Дрейф льда в Арктическом бассейне и окраинных арктических морях и связанные с ним процессы в ледяном покрове в значительной мере влияют на пространственное распределение льда, а также на величину ряда его характеристик: торосистость, сплоченность, раздробленность, длина и ориентация разрывов. Эта информация учитывается в хозяйственной деятельности многих организаций. Таким образом, прогнозы дрейфа льда являются важной составной частью ледовых прогнозов.

Актуальность долгосрочных прогнозов перемещения льда обусловлена тем, что они используются при определении со значительной заблаговременностью ожидаемых ледовых условий в окраинных арктических морях и на трассе Северного морского пути в начале предстоящего навигационного периода и на последующих его стадиях. В частности, с их учетом оцениваются такие показатели, как граница зоны с преобладанием многолетних льдов, ожидаемый ледообмен между Арктическим бассейном и арктическими морями, положение ледяных массивов в период плавания. Долгосрочные прогнозы дрейфа льда необходимы и в случае, когда по какой-то причине требуется выполнить прогностический расчет перемещения отдельного ледяного поля или некоторой совокупности полей. Такая ситуация может возникнуть при загрязнении льда или при вмерзании в дрейфующий лед судна и потере им возможности

самостоятельного движения. Прогнозы дрейфа льда за периоды 6–12 месяцев были всегда особенно востребованы при организации в Арктическом бассейне дрейфующей станции «Северный полюс».

До последнего времени долгосрочные прогнозы перемещения льда в бассейне составлялись в основном по климатическим данным. В начале XXI в. З.М. Гудкович и Ю.П. Доронин обобщили все сведения о дрейфе морских льдов в Арктике, собранные до 1970 г. (Гудкович, Доронин, 2001). При этом учитывался дрейф судов, зажатых льдом, перемещение расставляемых на льду элементарных буйев и радиовех. Учтен также дрейф всех отечественных станций «Северный полюс» и американской станции Т-3.

Благодаря выполненной работе качество климатической информации и возможности ее использования несколько повысились. По результатам анализа полученных данных в Арктическом бассейне выделено восемь сравнительно обширных локальных зон. По их наибольшему сечению длина двух взаимно перпендикулярных поперечников составляет от 530×650 км до 940×1380 км, а средние их значения равны 685 и 960 км. По каждой выделенной зоне для трех зимних месяцев (январь–март) и для трех летних месяцев (июль–сентябрь) рассчитано по одному климатическому результирующему вектору среднемесячного дрейфа льда. По зонам также рассчитаны эллипсы рассеивания, которые уже широко использовались при статистическом анализе векторов дрейфа (Лосев, 1973; Лосев и др., 1994).

Естественно, что климатические прогнозы, составляемые по данным со столь значительной пространственной и временной дискретностью, были весьма приближенными.

С 1979 г. начала поступать информация о перемещении автоматических буйев «Аргос», устанавливаемых на льду Арктического бассейна по международной программе. Эти данные по мере накопления также использовались при расчете климатических параметров дрейфа, в том числе и в прогностических целях. В значительной мере этому способствовали такие преимущества получаемых сведений, как регулярность их поступления, одинаково высокая точность в течение годового ледового цикла и в разных частях бассейна, охват обширной акватории.

Однако опыт составления прогнозов перемещения в Арктическом бассейне дрейфующих станций «Северный полюс» с СП-32 по СП-40 за промежутки времени от трех до двенадцати месяцев на основе климатических полей скорости дрейфа, рассчитанных за каждый месяц по данным буйев, показал, что и в этом случае получаемые оценки ожидаемого результирующего перемещения льда довольно часто оказывались недостаточно удачными. При этом используемые климатические поля скорости, как выяснилось по истечении прогностического периода, существенно отличались от фактических. Стало очевидно, что для повышения качества долгосрочных прогнозов дрейфа необходимо располагать не только климатическими его оценками, но и результатами расчета ожидаемого перемещения льда, полученными по более надежному, обоснованному методу. Такой метод к тому же должен обеспечивать возможность составления долгосрочных прогнозов в любое время года и задавать исходную точку на большей части Арктического бассейна.

СУЩНОСТЬ МЕТОДА

Предлагаемый метод является результатом обобщения сведений, получаемых по ежемесячным полям скорости дрейфа льда в Арктическом бассейне. Поля вос-

произведены по данным автоматических буев «Аргос», устанавливаемых на льду Арктического бассейна по международной программе. Для получения исходных сведений привлекались два варианта полей. В первом из них на бланковых картах масштаба 1:10 000000 представлены векторы скорости месячного результирующего дрейфа буев и изолинии скорости (изотахи), воспроизведенные экспертным путем с учетом этих векторов и полей среднемесячного приземного атмосферного давления. Такие поля дрейфа использовались за 36 лет с октября 1979 г. по сентябрь 2016 г. В полях второго варианта наряду с векторами скорости перемещения буев приведены векторы скорости дрейфа в узлах сетки квадратов 200×200 км, рассчитанные по методу объективной интерполяции. При их расчете дополнительно к данным буев привлекались значения параметров скорости, определяемые в ряде точек, выбранных на полях скорости первого варианта (Лосев и др., 2002). Поля второго варианта получены за 18 годовых ледовых циклов (с октября 1998 г. по сентябрь 2016 г.).

Характерной особенностью полей скорости дрейфа льда является наличие в них макромасштабных антициклонических вихревых образований. Нередко такой круговорот охватывает значительную часть Арктического бассейна. Это соответствующим образом проявляется в структуре поля скорости. Установлено, что рассчитанная за годовой ледовый цикл повторяемость антициклонических вихревых образований p может быть использована в качестве численного показателя полей скорости дрейфа льда. Выраженная в процентах величина p равна

$$p = (n/12) \cdot 100, \quad (1)$$

где n — число месячных полей скорости в течение годового ледового цикла с наличием в каждом из них антициклонического круговорота.

Вычисленные за все годы наблюдений значения повторяемости варьируют от 33 до 100 %, средняя их величина $\bar{p} = 66,7$ %, а стандартное отклонение $\sigma_p = 17,7$ %.

При близких значениях p за разные годовые ледовые циклы поля скорости дрейфа во многом идентичны друг другу. Если же в выделенной совокупности лет значения p за разные годы существенно различаются, то сходство между полями скорости за эти годы проявляется довольно слабо или совсем не выражено. Обнаружено также, что в годовых ледовых циклах с повышенной повторяемостью антициклонических вихревых образований дрейф льда намного интенсивнее, чем в циклах с относительно низкими значениями p (Лосев, Дымент, 2016).

Таким образом, повторяемость антициклонических круговоротов является параметром, который позволяет выделить из ретроспективных данных группы лет со сравнительно близкими полями скорости дрейфа льда. Для использования этого свойства величины p в прогностических целях совокупность лет, за которые рассчитаны как повторяемость антициклонических круговоротов, так и месячные поля векторов скорости дрейфа в узлах сетки, разделена на три группы. Годы со значениями повторяемости, соответствующими условию

$$p \geq \bar{p} + 0,674\sigma_p, \quad (2)$$

отнесены к группе лет с повышенной повторяемостью. Годы, в которых значения p определяются неравенством

$$\bar{p} - 0,674\sigma_p < p < \bar{p} + 0,674\sigma_p, \quad (3)$$

включены в группу лет с повторяемостью около средней. К группе лет с пониженной повторяемостью отнесены годы с повторяемостью

$$p \leq \bar{p} - 0,674\sigma_p. \quad (4)$$

Группы лет с разной повторяемостью антициклонических круговоротов за годовой ледовый цикл в месячных полях скорости дрейфа с октября 1998 г. по сентябрь 2016 г.

Характеристика повторяемости антициклонических круговоротов в группе лет	Диапазон числа месячных полей дрейфа льда с антициклоническими круговоротами в годовом ледовом цикле	Годы группы	Общее число лет в группе
Повышенная	10–12	2004, 2007, 2008, 2009, 2010, 2014, 2015	7
Около средней	7–9	1999, 2000, 2001, 2005, 2006, 2011, 2012, 2013, 2016	9
Пониженная	4–6	2002, 2003	2

Результаты группировки лет представлены в табл. 1. Приведенные во втором ее столбце диапазоны числа месячных полей скорости дрейфа с антициклоническими круговоротами соответствуют граничным значениям повторяемости в их совокупностях, выделенных по формулам (2) – (4). В третьем столбце таблицы вместо годовых ледовых циклов указаны годы, к которым относится вторая наиболее значительная часть каждого цикла. Так, цикл с октября 2001 г. по сентябрь 2002 г. обозначен 2002-м годом.

При прогностическом расчете перемещения льда из трех групп выбирается та, которая, как ожидается, по значениям p будет в большей мере, чем остальные, соответствовать текущему годовому ледовому циклу. Основой для определения аналоговой группы служат межгодовые колебания повторяемости месячных полей скорости дрейфа льда с антициклоническими круговоротами. Эти колебания отчетливо проявляются в многолетнем ходе изменения годовых значений p , представленном рис. 1 цвет. вклейки. Здесь же приведены их тренд, аппроксимированный полиномом второй степени (Лосев, Дымент, 2016), и две границы, которые разделяют все значения p на три совокупности, соответствующие выделенным группам лет. Выбор группы производится с учетом следующей информации:

- направленность изменения трендовой повторяемости p_T^* за последние годы и ее ожидаемая величина в текущем году;
- последовательность чередования межгодовых колебаний разной продолжительности;
- продолжительность колебания, закончившегося перед началом прогностического периода;
- экстремальные значения повторяемости данного колебания и группы лет, к которым относятся эти экстремумы;
- группа лет, к которой относится повторяемость последнего годового ледового цикла перед циклом текущим;
- изменение повторяемости в начавшемся, но еще не закончившемся колебании.

На основании анализа приведенной информации оценивается группа лет, которая по повторяемости полей с антициклоническими круговоротами будет, как ожидается, более адекватна текущему годовому ледовому циклу, чем две другие группы.

В случае, если прогноз составляется через 4 месяца после начала годового ледового цикла или позже, т.е. существует предпрогностический промежуток времени, когда уже имеется несколько рассчитанных месячных полей дрейфа за данный ледовый цикл, первый вариант выбора аналоговой группы дополняется вторым. Здесь за предпрогно-

стический промежуток времени по полученным данным определяется ход изменения накопленного числа N месячных полей скорости дрейфа льда с наличием в них антициклонических круговоротов от первого месяца ледового цикла до месяца начала прогностического периода (k). За те же месяцы по ретроспективным данным рассчитывается ход изменения накопленных среднемесячных значений в каждой из трех выделенных

групп $N^* = \sum_{i=1}^k n_i^*$. Величина n_i^* — среднее количество полей с антициклоническими круговоротами в i -м месяце, вычисленное по годам данной группы. На рис. 2 цвет. вклейки в качестве примера приведен график изменения значений N и N^* , рассчитанных за 4 месяца. Та группа, ход изменения показателя N^* которой наиболее идентичен ходу изменения показателя N за текущий цикл, принимается за аналоговую. Если аналоговая группа лет, выявленная по второму варианту, совпадает с группой, установленной по первому варианту, то выбор ее считается весьма надежным.

В случае, если аналоговая группа лет, выделенная по второму варианту, не совпадает с полученной по первому, а является смежной с ней, расчет ожидаемого перемещения льда выполняется по данным каждой группы. За прогностический вектор перемещения льда из заданной точки принимается вектор, осредненный по обоим вариантам. Если через несколько месяцев после составления такого прогноза возникает необходимость его уточнения, то рассчитанные за миновавший промежуток времени по данным каждой уже использованной группы перемещения льда сопоставляются с фактическим его дрейфом. Тот вариант, по которому рассчитанное перемещение льда ближе к фактическому, используется для уточненного расчета ожидаемого дрейфа за оставшуюся часть прогностического периода.

Таким образом, в целом рассматриваемый метод долгосрочного прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне по своей сути является аналоговым.

ТЕХНОЛОГИЯ СОСТАВЛЕНИЯ ПРОГНОЗОВ И ОЦЕНКИ ИХ ОПРАВДЫВАЕМОСТИ

Составление долгосрочных прогнозов дрейфа льда в Арктическом бассейне по изложенному методу реализуется на основе разработанного программного обеспечения. Первый модуль служит для выбора в интерактивном режиме аналоговой группы лет. В ходе его работы по всем имеющимся данным рассчитываются статистические характеристики повторяемости антициклонических круговоротов, визуализируется график многолетнего хода ее изменений. При наличии предпрогностического периода, относящегося к текущему ледовому циклу, демонстрируются кривые накопленного количества антициклонических круговоротов в полях скорости дрейфа в течение предшествующих 3–6 месяцев по годам, относящимся к группам лет с повышенной, средней и пониженной повторяемостью p , а также по данным текущего года (см. рис. 2 цвет. вклейки). Реализована возможность просмотра осредненных полей скорости дрейфа льда за предпрогностический период по данным текущего года и каждого года группы отдельно. На основе анализа предоставляемой информации эксперт выбирает аналоговую группу, и относящиеся к ней годы заносятся в файл.

При ежегодном выполнении расчетов после окончания очередного годового ледового цикла необходимо добавить в электронный архив относящиеся к нему месячные поля скорости дрейфа льда, а также занести координаты центров антициклонических круговоротов в соответствующий файл. Используемые в методе характеристики (средняя многолетняя повторяемость антициклонических кругово-

роты $\bar{p}$, стандартное отклонение σ_p , границы групп лет с разной повторяемостью, уравнение тренда, средние координаты центров антициклонических круговоротов) пересчитываются автоматически при запуске вышеуказанного программного модуля.

Непосредственно расчет прогностического результирующего перемещения льда в Арктическом бассейне осуществляет второй разработанный программный модуль. Последовательно по данным каждого года-аналога, отобранного на предыдущем этапе, из заданной исходной точки вычисляется вектор результирующего перемещения льда за три месяца, начиная с даты начала прогностического периода. Расчет векторов перемещения льда осуществляется по данным месячных полей скорости дрейфа льда в Арктическом бассейне на основе метода объективной интерполяции. Положение конца итогового вектора, полученного путем осреднения результирующих векторов, рассчитанных за трехмесячный период по каждому году-аналогу, принимается за начальное положение точки при расчете перемещения льда за следующий трехмесячный период. Аналогичные вычисления повторяются до тех пор, пока не будет построен вектор результирующего перемещения льда за необходимый промежуток времени.

В результате работы программы на экране визуализируется карта Арктического бассейна с наложенной на нее географической сеткой, масштаб изображения, траектория перемещения льда из заданной точки за весь прогностический период. Предусмотрена возможность воспроизвести вектор результирующего перемещения, а также сформировать таблицу географических координат местоположения исходной точки через каждые 3 месяца.

В состав программного обеспечения включена визуализация границ экономических зон Дании и Канады в Арктическом бассейне. Эта опция может быть использована в случае, если прогнозируемое перемещение дрейфующей станции направлено в сторону иностранной экономической зоны и необходимо определить время достижения ее границы.

Оценка оправдываемости расчетов и прогнозов вектора результирующего перемещения льда нуждается в выборе такого критерия, который соответствовал бы двумерной величине вектора дрейфа. Ранее выполненные исследования показали, что распределение отклонений проекций векторов скорости дрейфа льда $\Delta u_i = u_i - \bar{u}$, $\Delta v_i = v_i - \bar{v}$ на оси координат X, Y от составляющих $\bar{u}$, $\bar{v}$ среднего вектора $\bar{W}$ близко к двумерному нормальному распределению случайной величины (Лосев, 1973; Лосев и др., 1994). Его уравнение описывает поверхность распределения вероятности этих отклонений. В проекции на горизонтальную плоскость поверхность нормального распределения изображается семейством эллипсов рассеивания равной плотности вероятности. Для определения оправдываемости расчетов и прогнозов вектора результирующего перемещения льда нами принят эллипс допустимой погрешности. Необходимая для его расчета вероятность задана равной 0,6. Это объясняется тем, что такую вероятность попадания в интервал $-0,8\sigma \dots 0,8\sigma$ имеют отклонения любой одномерной ледовой характеристики от ее средней многолетней величины. Указанный интервал является мерой допустимой погрешности долгосрочного прогноза. Если его ошибка $\delta_s = S_n - S_\phi$, где S_n и S_ϕ — соответственно прогнозируемое и фактическое значения анализируемого параметра S , попадает в этот диапазон, оправдываемость прогноза $f = 100\%$. Если $|\delta_s| > 0,8\sigma$, считается, что $f = 0$. Понятно, что в случае, когда за прогнозируемую величину S_n характеристики принимается ее климатическое значение, средняя оправдываемость таких прогнозов будет приближаться к 60 %.

Принципы оценки оправдываемости прогнозов одномерных характеристик применимы и к прогнозам результирующего перемещения льда при проверке их с использованием эллипса допустимой погрешности.

Перейдем непосредственно к расчету этого эллипса. При его вычислении используются следующие характеристики:

– проекции u_i, v_i вектора $\vec{W}$ на оси X и Y в i -м году за расчетный промежуток времени;

– коэффициент их корреляции r ;

– стандартные отклонения проекций σ_u, σ_v ;

– проекции климатического вектора перемещения льда $\vec{u}, \vec{v}$;

– координаты начала климатического вектора x_n, y_n и его конца x_k, y_k .

Все приведенные характеристики находятся по данным результирующего перемещения льда за расчетный промежуток времени из заданной точки на основе месячных полей скорости дрейфа льда за все годы наблюдений.

Составляющие u_i, v_i вектора результирующего перемещения льда $\vec{W}_i$ являются обычно слабозависимыми величинами, что усложняет расчеты, связанные с двумерным нормальным распределением случайных величин. Для их упрощения проекции u_i, v_i в системе координат UOV преобразуются в проекции в системе координат $\xi O\eta$. Ось ξ этой системы задается по направлению большой оси симметрии отклонений $\Delta u_i, \Delta v_i$.

Проекция ξ_i, η_i того же вектора в преобразованной системе координат находятся по формулам:

$$\xi_i = u_i \cdot \cos \alpha + v_i \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

$$\eta_i = v_i \cdot \cos \alpha - u_i \cdot \sin \alpha. \quad (6)$$

Вычисленные составляющие становятся независимыми случайными величинами. В уравнениях (5, 6) α — угол отклонения большой оси симметрии от оси OU . Его величина является направлением большой оси эллипса рассеивания и определяется по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{2r\sigma_u\sigma_v}{\sigma_u^2 - \sigma_v^2}. \quad (7)$$

По составляющим ξ_i, η_i находятся их отклонения от составляющих климатического вектора $\Delta \xi_i = \xi_i - \bar{\xi}, \Delta \eta_i = \eta_i - \bar{\eta}$, по которым вычисляются их стандартные отклонения σ_ξ и σ_η .

Уравнение эллипса рассеивания с учетом принятых обозначений в каноническом виде записывается

$$\frac{(\Delta \xi)^2}{(kE_\xi)^2} + \frac{(\Delta \eta)^2}{(kE_\eta)^2} = 1. \quad (8)$$

Абсциссами и ординатами эллипса являются отклонения $\Delta \xi$ и $\Delta \eta$. В центре эллипса $\Delta \xi = \Delta \eta = 0$. Полуоси эллипса a и b равны $a = kE_\xi, b = kE_\eta$. При этом главные вероятные отклонения $E_\xi = 0,674\sigma_\xi, E_\eta = 0,674\sigma_\eta$.

Отношение полуосей эллипса рассеивания к главным вероятным отклонениям $k = a/E_\xi = b/E_\eta$ получено нами из формулы вероятности попадания в эллипс рассеивания. В работе (Абезгауз и др., 1966) параметр k связан с вероятностью P попадания в эллипс уравнением

Задание исходных данных

ПОЛОЖЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТОЧКИ ПРОГНОЗА

Широта: 82.955 °с.ш.; Долгота: 145.5 °в.д.

☐ Координаты задавать в дюльях градуса!

ПЕРИОД ПРОГНОЗА

Начало периода: Год: 14 Месяц: 10 Число: 1

Должно соответствовать указанным координатам

Конец периода: Год: 15 Месяц: 4 Число: 1

Эллипс рассеивания

СТРОИТЬ ЧЕРЕЗ КАЖДЫЕ

- ☐ 3 месяца
- ☐ 6 месяцев
- ☐ 9 месяцев
- ☐ 12 месяцев
- ☒ Только в конце периода прогноза

ВЕРОЯТНОСТЬ

- ☐ 0.5
- ☒ 0.6
- ☐ 0.7
- ☐ 0.8
- ☐ 0.974

☐ Не строить эллипс

OK Cancel

Рис. 3. Задание входных параметров в программном модуле расчета дрейфа льда в Арктическом бассейне.

$$P[(\Delta\xi, \Delta\eta) \subset B] = 1 - e^{-(k\rho)^2}. \quad (9)$$

Здесь $\rho = 0,477$. Величина P для эллипса допустимой погрешности, как уже отмечалось, принята равной 0,6. Подставляя значения ρ и P в приведенное равенство и решая его относительно k , получаем $k = 2,0$. Следовательно, $a = 1,348\sigma_\xi$, $b = 1,348\sigma_\eta$.

Модули для расчета и построения эллипса допустимой погрешности определения результирующего дрейфа льда включены в состав программного обеспечения, о котором говорилось выше. В ходе работы в интерактивном режиме пользователю наряду с уже приводимыми параметрами предлагается задать вероятность, которой должен соответствовать эллипс допустимой погрешности, а также промежуток времени, через который требуется его построение. В конце прогностического периода эллипс допустимой погрешности строится по умолчанию, однако предусмотрена возможность и не воспроизводить его вообще. Общий вид диалогового окна для задания всех необходимых исходных данных при составлении прогноза результирующего перемещения льда с применением разработанного программного обеспечения представлен на рис. 3.

Данный эллипс используется для оценки долгосрочных прогнозов перемещения льда, составленных как по данным климатического дрейфа, так и по изложенному методу. В первом случае за ожидаемое перемещение льда из заданной точки принимается климатический вектор результирующего дрейфа $\vec{W}_k$ за прогностический период (рис. 4 цвет. вклейки). Наряду с ним из заданной точки рассчитывается фактический дрейф льда (буя) за тот же промежуток времени. Если конец фактического вектора $\vec{W}_\phi$ оказывается в пределах эллипса допустимой погрешности, климатический прогноз считается оправдавшимся, то есть $f_k = 100\%$. Наоборот, при положении конца вектора $\vec{W}_\phi$ за пределами эллипса принимается, что прогноз не оправдался и $f_k = 0\%$. На рис. 4 цвет. вклейки место положения конца этого вектора обозначено знаком «+» красного цвета. В данном случае, как видим, климатический прогноз не оправдался.

Для определения оправдываемости прогноза, составленного по методу аналогов, из исходной точки строится вектор результирующего дрейфа $\vec{W}_m$, предвычисленный за установленный промежуток времени (см. рис. 4 цвет. вклейки). Затем воспроизводится тот же эллипс допустимой погрешности. Его центр совмещается с концом прогностического вектора $\vec{W}_m$. Как и в предыдущем варианте, оправдываемость прогноза f_m устанавливается по положению конца фактического вектора $\vec{W}_\phi$ перемещения льда относительно эллипса допустимой погрешности. Из рис. 4 цвет. вклейки следует, что $f_m = 100\%$.

Обобщенная эффективность метода (e) оценивается по данным достаточно представительной совокупности прогнозов, относящихся к разным периодам годового ледового цикла.

$$e = \bar{f}_m - \bar{f}_k. \quad (10)$$

Здесь $\bar{f}_m, \bar{f}_k$ — средние значения оправдываемости совокупности прогнозов, составленных, соответственно, по методу аналогов и по климатическому вектору перемещения льда.

Для оценки преимущества прогнозов дрейфа льда по методу аналогов по сравнению с климатическими прогнозами использованы также ошибки параметров дрейфа, возникающие при каждом из указанных вариантов прогностического расчета. Сопоставление осуществляется с учетом двух ошибок: ошибки по дальности δ_w и ошибки по направлению δ_α . Применительно к климатическому прогнозу они равны

$$\delta_{W_k} = W_k - W_\phi, \quad (11)$$

$$\delta_{\alpha_k} = \alpha_k - \alpha_\phi, \quad (12)$$

где α_k — направление климатического результирующего вектора перемещения льда из заданной точки за прогностический период.

При прогнозе по методу формулы ошибок аналогичны приведенным:

$$\delta_{W_m} = W_m - W_\phi, \quad (13)$$

$$\delta_{\alpha_m} = \alpha_m - \alpha_\phi. \quad (14)$$

Ошибки по дальности и направлению перемещения льда рассчитываются по каждому прогнозу с установленной его оправдываемостью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ПРОГНОЗОВ

Основательная проверка оправдываемости расчетов векторов результирующего перемещения льда за промежутки времени от 3 до 12 месяцев могла быть выполнена только на основе ретроспективных данных по дрейфу автоматических буев. Однако в этом случае расчет осуществляется без оценки ожидаемой аналоговой группы лет, как это предусмотрено при прогнозе, поскольку для каждого миновавшего промежутка времени эта группа лет уже известна, так как известна повторяемость антициклонических круговоротов в месячных полях скорости дрейфа в закончившемся ледовом цикле. Таким образом, оправдываемость расчетов перемещения льда, выполненных за прошлые годы, является оправдываемостью не прогностических, а диагностических расчетов. В то же время нельзя не учитывать, что сущность оправдываемости прогностических расчетов в случае безошибочного выбора аналоговой группы лет не отличается от ее определения при диагностических расчетах. В обоих вариантах расчет выполняется с использованием полей скорости дрейфа за те годовые ледовые циклы, в которых повторяемость антициклонических круговоротов этих полей близка к их повторяемости в текущем годовом ледовом цикле. На этом основании можно

полагать, что осредненные значения оправдываемости диагностических расчетов, выполненных по ретроспективным данным автоматических буев, в целом отображают среднюю оправдываемость прогнозов, составленных при правильном выборе аналоговых групп лет за использованные годовые ледовые циклы.

Проверка диагностических расчетов перемещения льда, основанная на сопоставлении параметров дрейфа, вычисленного из точки исходного положения буя, с параметрами его фактического дрейфа, реализована за 11 годовых ледовых циклов. При этом расчеты выполнялись как по методу, так и по климатическим данным. Результаты определения их оправдываемости и эффективности получены по каждой аналоговой группе за периоды разной продолжительности и представлены в табл. 2. Общее число проверенных случаев — 303.

Перейдем непосредственно к результатам оценки оправдываемости расчетов векторов дрейфа за периоды разной продолжительности.

Из сведений, приведенных в табл. 2, следует, что в группе лет со значениями p , близкими к их средней величине, оправдываемость расчетов и по методу, и по климатическим данным более высокая, чем в двух соседних группах. Значения оправдываемости расчетов по методу, осредненные по совокупности проверяемых случаев, варьируют здесь от 66 до 74 %, а по климату — от 55 до 66 %.

Таблица 2

Оправдываемость и эффективность расчетов результирующих векторов дрейфа льда

Продолжительность расчетного периода, месяцы	Число проверенных случаев	Средняя оправдываемость расчета, %		Эффективность метода, $e = \bar{f}_m - \bar{f}_k, \%$
		по климату, $\bar{f}_k$	по методу, $\bar{f}_m$	
Группа лет с повышенными значениями p				
12	28	32	53	21
9	17	59	65	6
6	33	51	64	13
3	50	42	55	13
3–12	128	44	58	14
Группа лет со значениями p около средней				
12	29	55	66	11
9	24	66	74	8
6	46	61	70	9
3	42	57	67	10
3–12	141	59	69	10
Группа лет с пониженными значениями p				
6	11	45	55	10
3	23	43	56	13
3–6	34	44	56	12
Обобщение по трем группам				
12	57	44	60	16
9	41	63	70	7
6	90	55	66	11
3	115	48	60	12
3–12	303	51	63	12

В группе лет с повышенными значениями p оправдываемость расчетов на 6–13 % меньше, чем в предыдущей группе. В последней аналоговой группе лет, в которой повторяемость антициклонических круговоротов в месячных полях скорости дрейфа за годовой ледовый цикл понижена, оправдываемость расчетов перемещения льда за 3 и 6 месяцев по методу близка к значениям f_m в группе лет с повышенными значениями p , несмотря на ограниченное число случаев, по которым можно было осуществить проверку.

Во всех группах аналоговых лет средняя оправдываемость расчетов дрейфа, выполненных по методу, $\bar{f}_m$ выше климатической оправдываемости $\bar{f}_k$, вследствие чего эффективность метода $e = \bar{f}_m - \bar{f}_k$, осредненная по совокупностям случаев проверки, имеет положительные значения.

В группе лет с повышенными значениями p при продолжительности расчетного периода, равной 9 месяцев, отмечается весьма существенное уменьшение эффективности. Подобное уменьшение эффективности проявляется и в группе лет со значениями p , близкими к средней величине. Вместе с тем осредненные по каждой группе лет значения e можно считать достаточно близкими. Средняя величина показателя эффективности диагностических расчетов по методу равна 12 %.

Нельзя не отметить, что при сопоставлении значений оправдываемости f_m и f_k , рассчитанных по отдельным буям, в некоторых случаях $f_m < f_k$. Возникновение этих ситуаций, по-видимому, обусловлено причинами, в том числе и случайными, которые в аналоговом методе не учитываются.

В табл. 3 приведены ошибки по дальности δ_w и по направлению δ_a , относящиеся к рассчитанным векторам результирующего дрейфа буев. В каждом проверяемом случае значения ошибок вычислены по формулам (11) – (14).

В группе лет с повышенной повторяемостью антициклонических круговоротов ошибки δ_{w_k} и δ_{w_m} в целом наиболее значительны. Диапазон их изменения в пределах всех принятых периодов при расчете по климату составляет 188–350 км, а по методу — 85–274 км. Ошибки δ_{w_k} , рассчитанные за каждый период по методу, в среднем на 64 км меньше ошибок δ_{w_k} , полученных по «климату». Средняя ошибка результирующего вектора дрейфа буев, вычисленного по методу, составляет 28 % от средней величины перемещения буев за период, а при расчете по «климату» — 38 %.

В группе лет со значениями p , близкими к их средней величине, отмечается хорошо выраженное увеличение ошибок δ_{w_k} и δ_{w_m} с возрастанием продолжительности расчетного периода. Тем не менее при продолжительности периода 12 месяцев эти ошибки не достигают величины, которую имеют ошибки предыдущей группы. В противоположность ошибкам той группы здесь при периодах 3 и 6 месяцев ошибки δ_{w_m} несколько больше ошибок δ_{w_k} . По этой причине осредненная по всем расчетным периодам ошибка $\bar{\delta}_{w_m}$ хотя и меньше средней ошибки $\bar{\delta}_{w_k}$, но их разность составляет всего 8 км, тогда как в предыдущей группе она равна 64 км.

Относительно группы лет с пониженными значениями p , в связи с ограниченным количеством имеющейся информации, можно только отметить, что при расчетном периоде 6 месяцев ошибки δ_{w_k} и δ_{w_m} почти совпадают с таковыми в первой из рассмотренных групп, а значения этих ошибок за трехмесячный период близки к их значениям в предыдущей группе. Средняя ошибка $\bar{\delta}_{w_m}$ здесь на 9 км меньше ошибки $\bar{\delta}_{w_k}$.

**Модули ошибок результирующих векторов дрейфа льда,
рассчитанных по климату и по изложенному методу**

Продолжительность расчетного периода, месяцы	Число проверенных случаев	Перемещение льда, осредненное по всем случаям, км	Ошибка по перемещению, км		Ошибка по направлению, градусы	
			по климату δ_{w_k}	по методу δ_{w_m}	по климату δ_{a_k}	по методу δ_{a_m}
Группа лет с повышенными значениями p						
12	28	889	350	274	28	25
9	17	677	207	85	18	15
6	33	484	188	155	22	24
3	50	584	233	175	23	23
3–12	128	637	244	180	23	23
Группа лет со значениями p около средней						
12	29	589	304	240	57	31
9	24	359	126	118	35	28
6	46	303	99	116	32	30
3	42	176	73	76	33	28
3–12	141	334	138	130	38	29
Группа лет с пониженными значениями p						
6	11	451	187	160	40	32
3	23	240	88	87	34	29
3–6	34	308	120	111	36	30
Обобщение по трем группам						
12	57	736	327	257	43	28
9	41	491	160	104	28	23
6	90	387	142	136	29	28
3	115	366	146	121	29	26
3–12	303	459	181	149	31	27

Осредненные по трем группам лет за все периоды ошибки δ_{κ} и δ_{μ} равны соответственно 181 км и 149 км. Таким образом, ошибки векторов результирующего дрейфа, рассчитанных по методу, в среднем на 32 км меньше, чем при их расчете по климатическим данным.

Ошибки векторов результирующего дрейфа льда по направлению δ_{α} более стабильны, чем ошибки по дальности. В группе лет с повышенными значениями p ошибки $\delta_{\alpha\kappa}$ и $\delta_{\alpha\mu}$ варьируют в пределах 18–28° и 15–25° соответственно, а средние их значения совпадают и равны 23°. Во второй анализируемой группе лет значения ошибки $\delta_{\alpha\kappa}$ находятся в пределах 32–57°, а ошибки $\delta_{\alpha\mu}$ – в пределах 28–31°. Средние значения этих ошибок равны соответственно 38° и 29°. В итоге ошибка направления результирующего вектора, рассчитанного по методу, в среднем на 9° меньше, чем при его расчете на основе климатических данных. В группе лет с пониженными значениями p ошибки $\delta_{\alpha\kappa}$ также больше $\delta_{\alpha\mu}$ и разница между их средними значениями составляет 6°.

Теперь обратимся к результатам проверки реальных прогнозов дрейфа льда, которые были составлены в начале годового ледового цикла 1.10.2015 – 1.10.2016 гг. Таких

прогнозов три. Продолжительность первого из них равна 12 месяцам, то есть охватывает весь цикл. Во втором прогнозе ожидаемое перемещение льда рассчитано за 6 месяцев с 1.01.2016 г. до 1.07.2016 г., а в третьем — за 3 месяца с 1.01.2016 г. до 1.04.2016 г.

Выбор аналоговой группы лет, по данным которой следовало рассчитывать перемещение льда, выполнен в основном с учетом двух признаков. Первый состоял в том, что продолжительность предыдущего межгодового колебания показателя p равна 6 годам (см. рис. 1 цвет. вклейки). Отсюда следовало ожидать, что текущее колебание будет более коротким. Во-вторых, максимум данного колебания отмечался год назад, и в текущем годовом ледовом цикле уменьшение p должно продолжаться, в результате чего по величине p этот цикл попадет в группу лет со значениями повторяемости, близкими к $\bar{p}$. После завершения годового ледового цикла фактические данные подтвердили правильность сделанного выбора.

При выполнении прогностических расчетов ожидаемого перемещения буев некоторые из них использовались в двух периодах с разной продолжительностью. Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что оправдываемость прогностических расчетов, выполненных как по климату, так и по методу, в данном случае необыкновенно высокая, а эффективность метода соответственно понижена и составляет в среднем 11 %. Ошибки прогнозов по своей величине во многом аналогичны ошибкам диагностических расчетов.

В целом, исходя из полученных значений оправдываемости расчетов ожидаемого перемещения льда за периоды разной продолжительности и возникающих при этом их ошибок, можно считать, что и диагностические, и прогностические расчеты дрейфа льда по методу более достоверны, чем его оценки по климатическим данным.

Таблица 4

Результаты проверки прогнозов результирующих векторов дрейфа льда с использованием данных автоматических буев за промежутки времени 3, 6 и 12 месяцев в годовом ледовом цикле 1.10 2015 г. – 1.10 2016 г.

№ буй	Параметры фактического дрейфа буй		Параметры прогностического дрейфа буй				Показатели прогноза			Модули ошибок прогноза			
			по климату		по методу		Оправды- ваемость		Эффек- тивность <i>e</i> , %	по климату		по методу	
	<i>W</i> _ф , км	<i>α</i> _ф , °	<i>W</i> _{км} , км	<i>α</i> _к , °	<i>W</i> _м , км	<i>α</i> _м , °	по климату <i>f</i> _к , %	по методу <i>f</i> _м , %		<i>δ</i> _{<i>W</i>_к} , км	<i>δ</i> _{<i>α</i>_к} , град.	<i>δ</i> _{<i>W</i>_м} , км	<i>δ</i> _{<i>α</i>_м} , град.
Прогностический период 12 месяцев, 1.10 2015 г. – 1.10 2016 г.													
25525	330	45	363	82	384	70	0	100	100	33	37	54	25
64757	740	138	835	135	770	134	100	100	0	95	3	29	4
48508	589	106	552	102	491	83	100	100	0	3	3	98	23
Прогностический период 6 месяцев, 1.01 2016 г. – 1.07 2016 г.													
25623	381	117	342	107	292	92	100	100	0	39	11	89	25
48508	147	47	201	86	194	69	100	100	0	54	39	47	23
48600	85	57	183	123	164	124	100	100	0	98	66	79	67
Прогностический период 3 месяца, 1.01 2016 г. – 1.04 2016 г.													
48600	76	47	79	94	62	77	100	100	0	3	48	14	30
64757	100	77	125	99	101	87	100	100	0	25	22	1	10
48770	51	11	49	24	60	14	100	100	0	2	13	9	3

ВЫВОДЫ

Повторяемость месячных полей скорости дрейфа льда за годовой ледовый цикл с наличием в каждом из них антициклонических вихревых образований может служить численным показателем, позволяющим по данным электронного архива выделить группу лет, поля скорости дрейфа которой могут быть использованы в качестве аналогов для прогностического расчета перемещения льда из заданной точки в текущем ледовом цикле за требуемый период.

При составлении прогноза только одна операция (выбор аналоговой группы) осуществляется экспертом. Выполнение всех остальных операций обеспечивается разработанным программным комплексом.

Прогностические расчеты перемещения льда, выполненные по методу за периоды от трех до двенадцати месяцев, как по оправдаваемости, так и по величине ошибок вычисляемых параметров более достоверны, чем расчеты, выполненные по климатическим данным.

Для решения вопроса о целесообразности использования метода в ААНИИ для составления долгосрочных прогнозов дрейфа льда в Арктическом бассейне необходимо в оперативном режиме в течение двух лет оценивать их оправдаемость.

Работа выполнена в рамках ЦНТП Росгидромета 2014–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н., Коровина И.А. Справочник по вероятностным расчетам. М.: Воениздат, 1966. 407 с.

Гудкович З.М., Доронин Ю.П. Дрейф морских льдов. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 112 с.

Лосев С.М. Статистический анализ относительной подвижности ледяного покрова // Труды ААНИИ. 1973. Т. 307. С. 28–40.

Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Кулаков И.Ю. Статистический анализ дрейфа льда в Арктическом бассейне по данным автоматических буев // Проблемы Арктики и Антарктики. 1994. № 67–68. С. 51–63.

Лосев С.М., Горбунов Ю.А., Сергеева И.А. Технология воспроизведения полей скорости дрейфа льда в Арктическом бассейне по данным автоматических буев // Труды ААНИИ. 2002. Т. 445. С. 101–112.

Лосев С.М., Дымент Л.Н. Повторяемость крупномасштабных вихревых образований в полях скорости дрейфа льда Арктического бассейна как показатель его интенсивности // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 72–83.

L.N. DYMENT, S.M. LOSEV

METHOD OF LONG-RANGE ICE DRIFT FORECAST IN THE ARCTIC BASIN

Based on the data of automatic “Argos” buoys, the frequency of occurrence of the monthly fields of ice drift velocity with presence of the anticyclonic eddy in them was calculated for the annual ice cycles. It was determined that at close values of the frequency of occurrence for different years, the drift velocity fields are also identical to each other in many aspects. On this basis the total number of years with initial data is divided into three groups by the value of the frequency of occurrence. The prognostic calculation of ice motion is performed by the monthly fields of the group the values of the frequency of occurrence of which will correspond to a greater extent to the frequency of occurrence of the current annual ice cycle. The article presents information on the basis of which the choice of the analogous group of years is presented. Technology of the prognostic ice motion calculation by the monthly drift velocity fields for the chosen analogous years is given. The results of determination of the skill score and efficiency of the method obtained taking into account the ellipse of permissible error are presented.

Keywords: Ice drift velocity fields, Anticyclonic eddy features, Ice drift prognostic calculation, Permissible error ellipse.

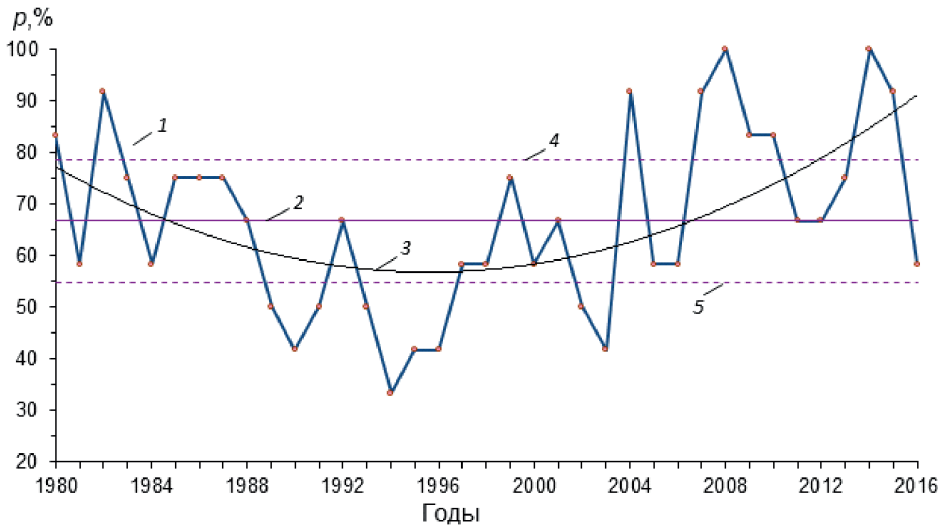


Рис. 1. Многолетнее изменение рассчитанной за годовые ледовые циклы повторяемости месячных полей скорости дрейфа льда с наличием в них антициклонических круговоротов.

1 — ход изменения значений p ; 2 — средняя многолетняя повторяемость; 3 — тренд; 4 — граница между группами повышенных значений p и значений p около средней величины; 5 — граница между группами пониженных значений p и значений p около средней величины.

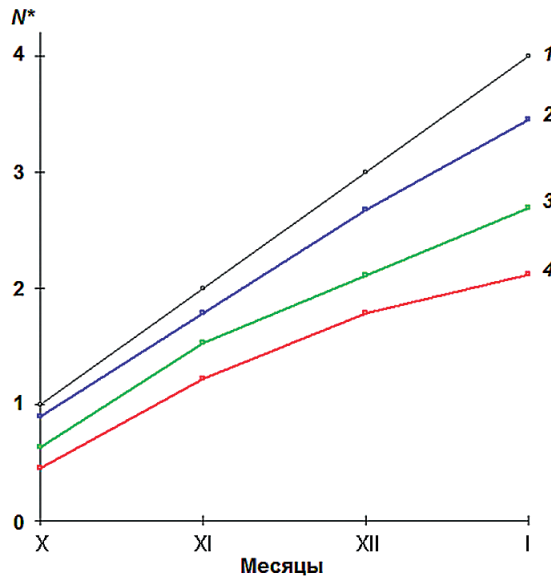


Рис. 2. Изменение накопленного числа месячных полей скорости дрейфа льда с антициклоническими круговоротами в предпрогностический период с октября по январь.

1 — текущий годовой ледовый цикл, 2015 г.; 2, 3, 4 — годы выделенных групп лет соответственно с повышенными, около средней и пониженными значениями повторяемости этих полей.

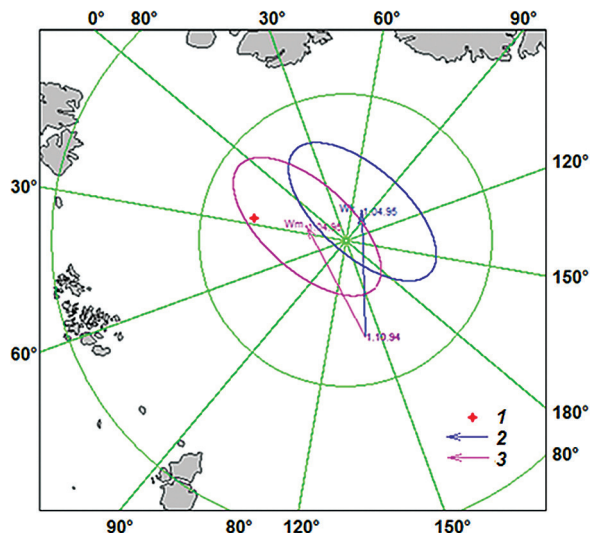


Рис. 4. Результаты оценки расчета результирующего перемещения льда в период с 1 октября 1994 г. по 1 апреля 1995 г. (буй № 63661).

1 — фактическое положение буя в конце расчетного периода; 2 — вектор результирующего перемещения льда, рассчитанный по климатическим данным; 3 — вектор результирующего перемещения льда, рассчитанный по изложенному методу.