

МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ДРЕЙФА ЛЬДА В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ОТ ТРЕХ МЕСЯЦЕВ

*Арктический и антарктический научно-исследовательский
институт, г. Санкт-Петербург*

Введение

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.

128

Долгосрочные прогнозы дрейфа льда были особенно востребованы при организации в Арктическом бассейне дрейфующих станций «Северный полюс» с СП–32 по СП–40. С учетом прогнозов выбиралось расположение ледяных полей для установки станции, а затем разрабатывались стратегии снятия станций. В настоящее время долгосрочные прогнозы дрейфа льда используются при организации дрейфующих станций на платформе.

До последнего времени долгосрочные прогнозы дрейфа льда в Арктическом бассейне составлялись на основе климатических месячных полей скорости дрейфа [1, 2]. Получаемые оценки ожидаемого результирующего перемещения льда иногда оказывались неудачными из-за существенного расхождения климатических полей скорости дрейфа льда с фактическими.

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 должен обеспечивать возможность составления долгосрочных прогнозов в любое время года и задавать исходную точку на большей части Арктического бассейна.

Основы метода

В результате анализа месячных полей скорости дрейфа льда было установлено, что вихревые образования, свойственные, как было уже известно ранее, полям скорости дрейфа за полугодовые и годовые периоды, являются характерной особенностью и месячных полей. При этом антициклонические круговороты присутствуют в месячных полях скорости дрейфа льда почти в 3 раза чаще циклонических [3]. Поскольку круговороты в полях скорости являются макромасштабными образованиями, то изменение их показателей позволяет судить об изменении дрейфа льда во всем бассейне в целом. Установлено, что в качестве численного показателя полей скорости дрейфа льда может быть использована повторяемость полей с антициклоническими круговоротами, рассчитанная за годовой ледовый цикл. Выраженная в процентах эта величина равна

$$p = \frac{n}{12} \cdot 100,$$

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

Значения повторяемости месячных полей скорости дрейфа с наличием в них антициклонических круговоротов в годовых ледовых циклах с 1979 по 2019 год варьируют, как видно из рис. 1, от 33 % до 100 %. Средняя их величина \bar{p} , изображенная на этом рисунке синей пунктирной линией, составляет 66 %, стандартное отклонение $\sigma_p = 18$ %.

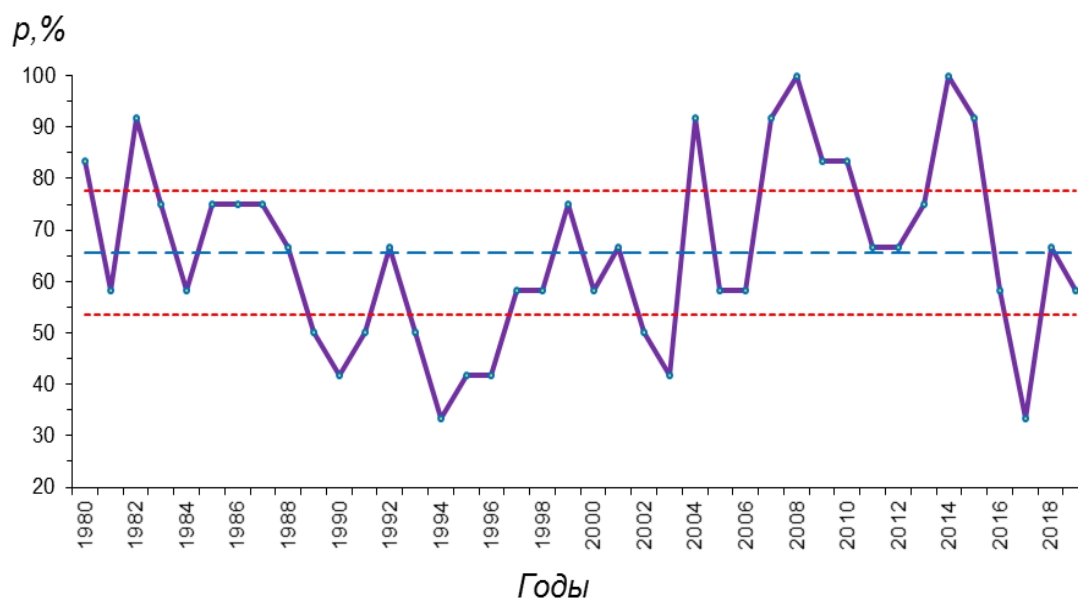


Рис. 1. Многолетнее изменение среднегодовой повторяемости антициклонических вихревых образований в месячных полях скорости дрейфа льда в Арктическом бассейне.

Установлено, что при близких значениях показателя 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 [3].

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.

1. Годы со значениями повторяемости, соответствующими условию

$$p \geq \bar{p} + 0,674\sigma_p,$$

отнесены к группе лет с повышенной повторяемостью.

2. Годы, в которых значения p определяются неравенством

$$\bar{p} - 0,674\sigma_p < p < \bar{p} + 0,674\sigma_p,$$

включены в группу лет с повторяемостью около средней.

3. К группе лет с пониженной повторяемостью отнесены годы с повторяемостью

$$p \leq \bar{p} - 0,674\sigma_p.$$

Границы выделенных групп обозначены красными пунктирными линиями на рис. 1, а результаты группировки лет представлены в табл. 1. Приведенные во втором ее столбце диапазоны числа месячных полей скорости с антициклоническими круговоротами соответствуют границам групп лет, выделенных по повторяемости. В третьем столбце таблицы вместо годовых ледовых циклов указаны годы, к которым относится вторая наиболее значительная часть каждого цикла. Так, цикл с октября 2001 по сентябрь 2002 года обозначен 2002-м годом.

При прогностическом расчете перемещения льда из трех групп, выделенных по величине повторяемости антициклонических круговоротов в месячных полях скорости дрейфа льда в ледовом цикле, выбирается та, которая, как ожидается, по значениям p будет в большей мере, чем остальные, соответствовать текущему годовому ледовому циклу.

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

**Группы лет с разной повторяемостью антициклонических круговоротов
за годовой ледовый цикл в месячных полях скорости дрейфа**

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, 2018, 2019	11
Пониженная	4–6	1994, 1995, 2002, 2003, 2017	5

Технология разработки прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне

Основой для определения аналоговой группы служит количество антициклонических круговоротов в полях скорости дрейфа льда за предшествующие прогнозу 3–4 месяца, а в случае сомнений, к какой группе отнести текущий ледовый цикл, учитывается многолетний ход изменения повторяемости месячных полей скорости дрейфа с антициклоническими круговоротами (см. рис. 1).

За предпрогностический промежуток времени (3–4 месяца до месяца начала прогностического периода) определяется ход изменения накопленного числа N месячных полей скорости дрейфа льда с наличием в них антициклонических круговоротов. Таким же путем за тот же промежуток времени рассчитывается ход изменения накопленных среднемесячных значений в каждой из трех выделенных групп N^* . Та группа, ход изменения показателя N^* которой наиболее идентичен ходу изменения показателя N , принимается за аналоговою, и при дальнейшем прогностическом расчете используются данные скорости дрейфа льда только ледовых циклов, относящихся к этой группе.

Для выбора в интерактивном режиме аналоговой группы лет используется разработанный авторами метода программный модуль *PredPrognoz*.

В качестве примера на рис. 2 приведены изменения накопленной повторяемости антициклонических круговоротов в месячных полях дрейфа льда в предпрогностический период в апреле 2018 г. и в выделенных группах лет, воспроизведенные модулем *PredPrognoz*.

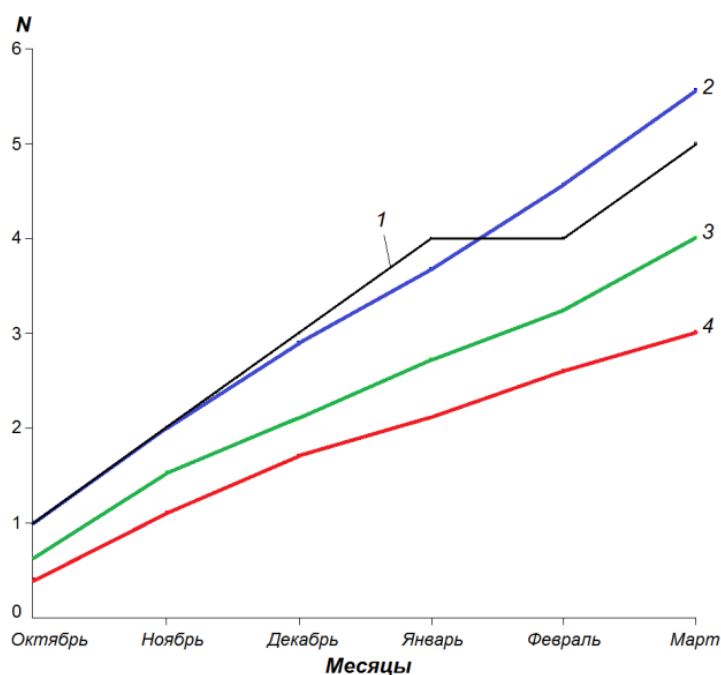


Рис. 2. Изменение количества месячных полей дрейфа льда с антициклоническими круговоротами в предпрогностический период в апреле 2018 г. (1) и по данным аналоговых групп лет (2–4): 2 – группа повышенной повторяемости; 3 – группа с повторяемостью около среднего значения; 4 – группа с пониженной повторяемостью.

Непосредственно расчет прогностического результирующего перемещения льда в Арктическом бассейне осуществляет разработанный авторами метода программный модуль *PrognozSP_Ellips*. Последовательно по данным каждого года-аналога, отобранного на предыдущем этапе, из задаваемой исходной точки вычисляется вектор результирующего перемещения льда за три месяца начиная с даты начала прогностического периода. Расчет векторов перемещения льда осуществляется по данным установленных аналоговых 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 на заданную дату окончания прогноза.

Для оценки долгосрочных прогнозов перемещения льда, составленных по изложенному методу, используется эллипс допустимой погрешности определения результирующего дрейфа льда. Данный эллипс строится при задаваемом значении вероятности и ограничивает

зону, в которую с этой вероятностью попадет конец вектора прогностического дрейфа льда. Для оценки долгосрочных прогнозов перемещения льда до 6 месяцев использовался эллипс допустимой погрешности при вероятности, равной 0,6, что соответствует вероятности попадания в интервал $-0,8\sigma - 0,8\sigma$ от средней многолетней величины, а для более продолжительных периодов – 0,68, что соответствует вероятности попадания в интервал $\pm\sigma$. Если конец фактического вектора \vec{W}_ϕ оказывается в пределах эллипса допустимой погрешности, прогноз считается оправдавшимся. Наоборот, при положении конца вектора \vec{W}_ϕ за пределами эллипса принимается, что прогноз не оправдался.

Данный эллипс использовался и при сравнении результатов долгосрочных прогнозов, составленных как по климатическим данным, так и по предложенному методу.

Проверка метода

Основательная проверка оправдываемости расчетов векторов результирующего перемещения льда за промежутки времени от 3 до 12 месяцев на этапе завершения работы могла быть выполнена только на основе ретроспективных данных по дрейфу автоматических буев. Общее число всех случаев оценки оправдываемости векторов результирующего перемещения буев, рассчитанных по методу, равно 303.

133

В табл. 2 приведены сведения о количестве проверенных диагностических расчетов и продолжительности охваченных ими периодов. Проверка была реализована по данным за 11 годовых ледовых циклов в период с 1994 по 2014 год. Она учитывает все аналоговые группы лет.

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. 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.

Для оценки преимущества прогнозов дрейфа льда по методу по сравнению с климатическими прогнозами использованы также ошибки параметров дрейфа, возникающие при каждом из указанных вариантов прогностического расчета.

Таблица 2

Оправдываемость и эффективность расчетов результирующих векторов дрейфа льда

Продолжительность расчетного периода, месяцы	Число проверенных случаев	Средняя оправдываемость расчета, %		Эффективность метода, %
		по климату	по методу	
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 табл. 3 приведены ошибки по дальности и по направлению, относящиеся к рассчитанным векторам результирующего дрейфа буев. В каждом проверяемом случае значения ошибок установлены на основании параметров фактического дрейфа буя из исходной точки и параметров дрейфа, рассчитанного из той же точки по методу и по климатическим данным.

**Модули ошибок результирующих векторов дрейфа льда, рассчитанных
по климату и по 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	по методу	по климату	по методу
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 по дальности векторов результирующего дрейфа, рассчитанных по методу, в среднем на 32 км меньше, чем при их расчете по климатическим данным, и равны, соответственно, 149 и 181 км.

Ошибки векторов результирующего дрейфа льда по направлению более стабильны, чем ошибки по дальности. При осреднении по всем группам лет ошибка направления результирующего вектора, рассчитанного по методу, в среднем на 4° меньше, чем при его расчете на основе климатических данных.

В целом, учитывая оправдываемость расчетов результирующих векторов дрейфа льда за периоды от 3 до 12 месяцев и возникающие при этом ошибки векторов по их величине и

направлению, можно считать, что расчеты перемещения льда по методу более достоверны по сравнению с его климатическими оценками.

Результаты испытаний метода

Испытание метода проводилось в отделе ледового режима и прогнозов ААНИИ в течение двух ледовых циклов с октября 2017 по октябрь 2019 года.

Прогнозы составлялись и оценивались для акватории Арктического бассейна. Предметом прогноза являлось местоположение автоматического буя через временные периоды продолжительностью 3, 6, 9 и 12 месяцев.

Оправдываемость и эффективность прогнозов различной продолжительности за период испытаний приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оправдываемость и эффективность прогнозов дрейфа льда в Арктическом бассейне различной продолжительности, составленных по разработанному методу в течение ледовых циклов 2017/2018 и 2018/2019 гг.

Продолжительность расчетного периода, месяцы	Количество прогнозов		Оправдываемость, %		Эффективность, %	
	2017/2018	2018/2019	2017/2018	2018/2019	2017/2018	2018/2019
3	28	52	68	62	4	18
6	19	31	68	61	31	35
9	8	17	50	65	12	36
12	0	6	-	50	-	17

Средняя эффективность прогнозов составила: для прогнозов с продолжительностью расчетного периода 3 месяца – 13 %, для прогнозов продолжительностью 6 месяцев – 34 %, для прогнозов продолжительностью 9 месяцев – 28 %, для прогнозов продолжительностью 12 месяцев – 17 %.

Результаты испытаний показывают, что прогноз по предлагаемому методу имеет хорошую оправдываемость, которая при продолжительности периода прогноза от 3 до 6 месяцев составляет 64 %. Эффективность метода прогноза на этот период составляет в среднем 21 % по сравнению с климатическим прогнозом. Прогнозы дрейфа льда при продолжительности периода прогноза 9 и 12 месяцев носят оценочный характер, так как на протяжении этого периода всегда выполняется уточнение прогнозов. Тем не менее

эффективность в этот период по сравнению с климатическим прогнозом составляет в среднем 26 %.

В ходе испытаний также определялись ошибки прогноза векторов результирующего дрейфа льда. В табл. 5 приведены ошибки по дальности и по направлению, рассчитанные для периодов прогноза различной продолжительности. В каждом проверяемом случае значения ошибок установлены на основании параметров фактического дрейфа автоматического буя из исходной точки и параметров дрейфа, рассчитанного из той же точки по методу и по климатическому прогнозу.

Таблица 5

Модули ошибок результирующих векторов дрейфа льда, рассчитанных по климатическому прогнозу и по методу

Продолжительность расчетного периода, месяцы	Число прогнозов	Ошибка по направлению, градусы		Ошибка по перемещению, км		Различие ошибок по климату и методу	
		по климату	по методу	по климату	по методу	направление, градусы	перемещение, км
3	80	55	48	175	163	7	12
6	50	50	38	294	238	11	56
9	25	46	33	362	319	14	43
12	6	39	23	431	357	16	74

Ошибка направления результирующего вектора, рассчитанного по методу, в среднем на 11° меньше, чем при его расчете на основе климатических данных. Осредненная по всем расчетным периодам ошибка по перемещению, полученная при составлении прогнозов по методу, также меньше соответствующей ошибки прогноза по климату и составляет 46 км.

Заключение

Проведенные исследования позволили разработать метод долгосрочного прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне с заблаговременностью от трех до двенадцати месяцев.

Метод позволяет предсказывать положение в Арктическом бассейне заданного ледяного поля с заблаговременностью от 3 месяцев, рассчитывая географические координаты конца прогностического вектора результирующего перемещения.

Результаты прогнозов показали сравнительно высокую оправдываемость. Метод характеризуется положительной эффективностью по сравнению с климатическими оценками.

Для дальнейшего совершенствования метода долгосрочных прогнозов дрейфа льда необходимо пополнять электронный архив среднемесячных полей скорости дрейфа льда и фиксировать наличие в них антициклонических круговоротов, увеличивая тем самым объем выборки для каждой аналоговой группы.

На основе вышеприведенных результатов испытаний Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета на заседании от 18 сентября 2020 г. приняла решение рекомендовать внедрить метод долгосрочного прогноза дрейфа льда в Арктическом бассейне с заблаговременностью от трех месяцев в оперативную практику ФГБУ «ААНИИ» в качестве основного.

Список литературы

1. *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.

2. *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.

3. *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.