

МЕТОДИКА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ

И.О. Думанская

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации;
dumansk@rambler.ru*

Введение

В отделе морских гидрологических прогнозов Гидрометцентра России составляется долгосрочный прогноз ледовых условий на российских морях на предстоящую зиму. Прогнозируется ряд характеристик по пунктам неарктических морей (в том числе Берингова и Охотского морей, а также Татарского пролива): сумма градусной мороза (СГДМ); первое появление льда (ПП); максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость моря (МЛ); максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда (МТ); дата окончательного очищения моря ото льда (ОО); продолжительность ледового периода (ЛП).

Долгосрочный прогноз ледовых характеристик ежегодно в начале октября публикуется в бюллетене «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на предстоящий ледовый сезон», который рассылается пользователям.

В связи с выполнением задачи по совершенствованию методической базы для прогнозирования ледовых характеристик, в лаборатории ледовых прогнозов в течение нескольких последних лет разрабатывалась новая комплексная методика долгосрочного прогнозирования для неарктических морей европейской части России. Разделы этой методики, касающиеся долгосрочного ледового прогноза на Баренцевом, Белом, Балтийском, Азовском

и Каспийском морях были представлены на заседаниях ЦМКП Росгидромета и получили рекомендации к использованию в оперативной практике ФГБУ «Гидрометцентр России». К настоящему моменту сделана попытка распространение единого методического подхода и на восточные моря.

1. Используемые данные

Информационной основой методики долгосрочного прогноза ледовых условий на неарктических морях являются данные электронного архива метеорологической и ледовой информации, формируемого в лаборатории ледовых прогнозов Гидрометцентра России. При разработке метода прогноза использовались:

- данные наблюдений за среднемесячной температурой воздуха у поверхности Земли на морских гидрометеорологических станциях неарктических морей, по которым рассчитывалась сумма градусодней мороза; информация о рядах наблюдений приведена в табл. 1;

- данные наблюдений за среднемесячной температурой воздуха у поверхности Земли на метеорологических станциях, характеризующей термическое состояние воздушных масс: причерноморской (Ростов-на-Дону), сибирской (Иркутск), берингоморской (о. Беринга), воздушной массы Охотского моря (Александров-Сахалинский);

- данные наблюдений за приземным давлением в пунктах, расположенных в районах центров действия атмосферы (ЦДА): алеутского минимума (о. Беринга), сибирского максимума (Иркутск), исландского минимума (Рейкьявик) и азорского максимума (Понта-Делгада);

- таблицы дат наступления ледовых фаз, продолжительности ледовых периодов и толщин припайного льда, составленные по данным наблюдений морских гидрометеорологических станций (ГМС); информация о рядах наблюдений приведена в табл. 1;

- таблицы ледовитости дальневосточных морей; информация о рядах наблюдений приведена в табл. 1.

Длина рядов данных о параметрах центров действия атмосферы и термическом состоянии воздушных масс составляет 107 лет (с 1910 по 2016 год).

Таблица 1

Ряды наблюдений за метеорологическими и ледовыми характеристиками, использованные при разработке метода прогноза, и пропуски данных в них

Море	Район моря или пункт наблюдений	Характеристика	Период наблюдений, годы	Число лет в периоде наблюдений	Пропуски данных, %
Берингово море	Эгвекинот	СГДМ	1937–2016	80	6
		ЛФ	1927–2016	90	22
		ТЛ	1936–2016	81	19
	Анадырь	СГДМ	1899–2016	118	8
		ЛФ	1926–2016	91	38
		ТЛ	1941–2016	76	41
	Петропавловск-Камчатский	СГДМ	1930–2016	87	0
	Петропавловский маяк	ЛФ	1910–2016	107	19
Все море	Л	1960–2016	57	0	
Охотское море	Магадан	СГДМ	1932–2016	85	0
		ЛФ	1929–2016	88	3
	Охотск	СГДМ	1926–2016	91	0
		ЛФ	1925–2016	92	10
	Аян	ТЛ	1934–2016	83	10
	Все море	Л	1950–2016	67	2
Японское море	Советская гавань	СГДМ	1911–2016	106	2
		ЛФ	1925–2016	92	3
		ТЛ	1929–2016	88	14
	Татарский пролив	Л	1951–2016	66	0
	Среднее			87	10

Примечание. СГДМ – сумма градусодней мороза; ЛФ – ледовые фазы; ТЛ – толщина припайного льда; Л – ледовитость.

В рядах метеорологических и ледовых характеристик, информация о которых приводится в табл. 1, имеются пропуски. Причиной пропусков информации является либо отсутствие наблюдений в отдельные годы, либо непоступление информации в ФГБУ «Гидрометцентр России» по каналам связи.

2. Технология долгосрочного прогноза

Основными в области долгосрочных ледовых прогнозов являются физико-статистические методы, опирающиеся на предположение о преемственности и цикличности процессов, происходящих в природе [1, 2]. Ледовые процессы на всех морях связаны со спецификой макроциркуляционных атмосферных процессов [3], которые, в свою очередь, зависят от состояния центров действия атмосферы в месяцы, предшествующие ледовому сезону [4, 6–8].

В основу методики прогноза заложено предположение о том, что на будущую суровость зимы и значения ледовых характеристик в любом пункте влияют состояние, интенсивность и взаимодействие крупных термобарических атмосферных структур; положение пункта прогноза относительно центров этих структур; наличие накладывающихся друг на друга циклов, определяемых внешним (космическим) воздействием.

Общие принципы технологии долгосрочного прогноза для неарктических морей подробно изложены в ряде источников [5, 9–11, 13]. Технология прогноза представляет собой ансамблевый метод, включающий три компонента для расчета ледовых параметров.

1. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования поля приземной температуры воздуха над азиатско-тихоокеанским сектором.

2. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования характеристик поля приземного давления над азиатско-тихоокеанским сектором.

3. Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых параметров на гармонические составляющие с последующей экстраполяцией их сумм на предстоящий ледовый сезон.

В окончательном прогнозе ледовых характеристик учитывается вклад каждого из трех компонентов. При этом величина этого вклада в общий результат пропорциональна обеспеченности расчета в рамках каждого компонента. При разработке метода прогноза непосредственно для Берингова моря, Охотского моря и Татарского пролива исследовалась связь характеристик ледового режима этих морей с параметрами атмосферных процессов:

– среднемесячными значениями приземной температуры

воздуха, характеризующими причерноморскую, сибирскую, беринговоморскую воздушные массы и воздушную массу Охотского моря, а также разностями этой температуры на фиксированных створах ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 (см. табл. 2);

– среднемесячными значениями приземного давления в центрах действия атмосферы и разностями этих значений на фиксированных створах ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_3 (см. табл. 2).

Таблица 2

Предикторы (x), характеризующие поле приземной температуры (ППТ) и поле приземного давления (ППД) в уравнениях расчета ледовых характеристик для дальневосточных морей

Объект ППТ	x для ППТ	Объект ППД	x для ППД
Номер года	N_G	Номер года	N_G
Причерноморская воздушная масса	T_P	Исландский минимум	P_u
Сибирская воздушная масса	$T_{Ир}$	Сибирский максимум	P_c
Беринговоморская воздушная масса	T_B	Азорский максимум	$P_{аз}$
Воздушная масса Охотского моря	T_{ACx}	Алеутский минимум	$P_{ал}$
Зональный градиент температуры (ΔT_1)	$T_{Ир} - T_{ACx}$	Зональный градиент давления (ΔP_1)	$P_c - P_u$
Зональный градиент температуры (ΔT_2)	$T_{Ир} - (T_{ACx} + T_B)/2$	Зональный градиент давления (ΔP_2)	$P_u - P_{ал}$
Меридиональный градиент температуры (ΔT_3)	$T_{ACx} - T_B$	Меридиональный градиент давления (ΔP_3)	$P_{аз} - P_u$

Примечание. Предикторы: среднемесячная приземная температура воздуха в пункте, характеризующая теплозапас воздушной массы:

T_P – в Ростове-на-Дону, $T_{Ир}$ – в Иркутске, T_B – на о. Беринга,

T_{ACx} – в Александрове Сахалинском; приземное давление в районе

соответствующего центра действия атмосферы: P_u – в Рейкьявике,

P_c – в Иркутске, $P_{аз}$ – в Понта-Делгада, $P_{ал}$ – на о. Беринга.

Корреляционный анализ осуществлялся по данным девяти месяцев, предшествующих ледовому сезону (с января по сентябрь включительно). Ограничение набора предикторов данными за сентябрь было определено тем, что результаты прогноза предоставляются потребителям ледовой информации уже в начале октября. По результатам анализа были выбраны наиболее значимые предикторы, которые и вошли в окончательные уравнения.

Набор предикторов, использованный для ледового прогноза в дальневосточных морях, отличается от предикторов, выбранных ранее для европейских морей [11, 12]. В расчет добавлены данные о давлении в районе о. Беринга (характеризующем состояние алеутского минимума) и данные о температуре в районе о. Беринга и Александрова-Сахалинского, характеризующей термическое состояние берингоморской воздушной массы и воздушной массы Охотского моря. Выбор именно этих ГМС определяется в значительной мере длиной имеющихся рядов наблюдений, которая по условию разработки прогноза должна составлять не менее 107 лет. Таких рядов в районе дальневосточных морей крайне мало.

Уравнения для всех пунктов имеют аналогичный вид, differing by weight coefficients. Число весовых коэффициентов, отличных от нуля, в каждом уравнении не превышает 20 % ряда рассчитываемой ледовой характеристики. Линейное корреляционное уравнение имеет вид:

$$y = A_i(B_1 x_1 + B_2 x_2 + \dots + B_n x_n) + C_i, \quad (1)$$

где B_1, B_2, \dots, B_n – весовые коэффициенты; A_i и C_i , – коэффициенты в линейном уравнении для i -го элемента ледового режима (номер года, сумма градусодней мороза, дата начала ледообразования, максимальная за ледовый сезон ледовитость моря, максимальная за ледовый сезон толщина льда, дата очищения моря ото льда).

Во всех уравнениях первым предиктором (x_1) является номер года. Слагаемое в уравнении, описывающее зависимость межгодовой изменчивости от номера года компенсирует долю тренда, не учтенную особенностями термобарического состояния воздушных масс в январе–сентябре. Это свидетельствует о том, что при одном и том же сценарии развития термобарического процесса результат будет различен.

В табл. 2 приведены предикторы (x) для расчета ледовых характеристик по полю приземной температуры и по полю приземного давления. Для составления уравнений использовались значения температуры воздуха и давления для января–сентября года, предшествующего прогнозу.

Для третьего компонента прогноза было сделано предположение, что в пределах обширных территорий планетарного масштаба изменчивость природных явлений должна быть подвержена влиянию тех же циклов (являющиеся, вероятно, результатом внешнего космического воздействия), параметры которых были использованы ранее для прогноза ледовых условий в европейских морях России. Периоды циклов определялись по ряду приземной температуры воздуха в Санкт-Петербурге, для которого имеется наибольшее число наблюдений. Разложению на гармоники подвергался 200-летний ряд отклонений СГДМ от генерального тренда (с ледового сезона 1805/1806 по сезон 2004/2005 гг.) При этом генеральный тренд также описывался длиннопериодной гармоникой, наиболее близко соответствующей полиномиальному тренду 2-го порядка [11, 13]. После 2005 г. прошло 11 лет, и мы имеем возможность оценить устойчивость работы гармоник.

В табл. 3 приведены параметры для 31 гармоники, сумма которых аппроксимирует СГДМ в Санкт-Петербурге, а также коэффициенты корреляции (r) для ряда, оканчивающегося в 2005 г., и для ряда, оканчивающегося в 2016 г. Для первого ряда средний по гармоникам коэффициент корреляции равен 0,14, суммарный – 0,80; для второго ряда средний коэффициент корреляции равен 0,13, суммарный – 0,78. Анализ табл. 3 свидетельствует о низкой устойчивости гармоник с малыми значениями частных коэффициентов корреляции (до 0,1 включительно), в то время как более значимые гармоники в целом сохранили свои позиции.

В работе [13] было показано, что для европейских морей коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по суммам гармоник, и соответствующими рядами фактических значений (для разных ледовых характеристик и пунктов) варьируют от 0,6 до 0,8. Было также обращено внимание на близость периодов отдельных найденных гармоник с периодами колебания гравитационных воздействий (орбитальных периодов) Юпитера,

Сатурна, Урана, Нептуна, а также с основными циклами солнечной активности.

Таблица 3

**Периоды гармоник (Δt) и коэффициенты корреляции (r)
для гармоник**

№ гармоника	Δt , годы	r на 2005 г.	r на 2016 г.
1 (ген. тренд)	1008,80	0,40	0,44
2	173,93	0,07	0,08
3	84,07	0,12	0,11
4	25,47	0,10	0,07
5	21,74	0,18	0,18
6	18,14	0,10	0,05
7	13,56	0,10	0,10
8	12,67	0,11	0,10
9	11,21	0,14	0,14
10	9,78	0,17	0,13
11	9,27	0,18	0,16
12	7,84	0,20	0,21
13	7,57	0,05	0,05
14	6,48	0,07	0,11
15	5,65	0,10	0,07
16	5,30	0,13	0,13
17	5,05	0,16	0,14
18	4,92	0,14	0,15
19	4,66	0,10	0,10
20	4,37	0,13	0,12
21	4,23	0,10	0,10
22	3,94	0,18	0,18
23	3,38	0,13	0,14
24	3,08	0,17	0,17
25	2,83	0,14	0,15
26	2,69	0,10	0,10
27	2,59	0,12	0,12
28	2,40	0,17	0,18
29	2,34	0,12	0,12
30	2,26	0,24	0,22
31	2,03	0,18	0,18
Суммарный коэффициент корреляции r		0,80	0,78

В табл. 4 приведены коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по суммам гармоник, и соответствующими рядами фактических значений для разных ледовых характеристик и пунктов Берингова моря, Охотского моря, Татарского пролива, которые варьируют от 0,5 до 0,8. Эти значения близки к данным для европейских морей, что свидетельствует о возможности применения единых гармоник для европейских и азиатских морей.

Выводы, полученные в результате анализа табл. 3 и 4, позволили аппроксимировать значения СГДМ и ледовых характеристик Берингова моря, Охотского моря и Татарского пролива в третьем компоненте методики долгосрочного прогноза суммой гармоник, использованных ранее в ледовом прогнозе для европейских морей.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по суммам гармоник, и рядами фактических значений

Море, район моря	Пункт	СГДМ	ПП	МТ	ОО	МЛ
Берингово море	Эгвекиног	0,76	0,72	0,61	0,83	0,70
	Анадырь	0,46	0,74	0,69	0,79	
	Петропавловск-Камчатский	0,60	0,58	н.д.	0,56	
Охотское море	Магадан	0,63	0,68	н.д.	0,65	0,70
	Аян	н.д.	н.д.	0,65	н.д.	
	Охотск	0,63	0,53	н.д.	0,67	
Татарский пролив	Советская Гавань	0,74	0,66	0,62	0,66	0,67
Среднее		0,53	0,65	0,64	0,69	0,69

Примечание. Здесь и в табл. 5–10: СГДМ – сумма градусодней мороза; ПП – первое появление льда; МТ – максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда; ОО – дата окончательного очищения моря ото льда; МЛ – максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость моря; ЛП – ледовый период, н. д. – нет данных.

В табл. 5 приведены результаты расчетов ледовых характеристик по зависимому ряду для Берингова моря. В табл. 6 – ежегодные результаты расчетов по независимому 5-летнему ряду (с ледового сезона 2011/2012 по сезон 2015/2016 гг.).

В табл. 7 и 9 приведены результаты расчетов ледовых характеристик по зависимому ряду для Охотского моря и Татарского пролива. В табл. 8 и 10 – ежегодные результаты расчетов по независимому 5-летнему ряду (с ледового сезона 2011/2012 по сезон 2015/2016 гг.) для тех же акваторий.

Таблица 5

Результаты расчета ледовых характеристик по зависимому ряду для Берингова моря

Характеристика	Пункт, район моря	Число лет наблюдений	ОБ метода, %	ОБ климатическая, %	ЭФ, %
СГДМ	Э	70	94	67	27
	АН	95	79	67	12
	ПК	82	85	66	19
ПП	Э	67	93	75	18
	АН	59	93	76	17
	ПМ	80	88	69	19
ОО	Э	64	97	68	29
	А	53	98	70	28
	ПМ	81	90	73	17
ЛП	Э	58	88	67	21
	АН	47	98	77	21
	ПМ	72	90	75	15
МТ	Э	60	92	66	26
	АН	39	97	70	27
МЛ	БМ	52	96	70	26
Среднее		65	92	70	22

Примечание. Здесь, а также в табл. 6–10: ОБ – обеспеченность; ЭФ – эффективность; Э – Эгвекинот; АН – Анадырь; ПК – Петропавловск-Камчатский; ПМ – Петропавловский маяк; БМ – Берингово море.

Таблица 6

**Результаты расчета ледовых характеристик по независимому
5-летнему ряду для Берингова моря**

Характеристика	Пункт, район моря	Ледовые сезоны					ОБ метода, %	ОБ климатическая, %	ЭФ, %
		2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	2015/ 2016			
СГДМ	Э	+	+	+	+	+	100	20	80
	АН	+	+	+	+	+	100	20	80
	ПК	+	+	+	+	+	100	60	40
ПП	Э	+	+	+	+	+	100	80	20
	А	+	+	+	+	+	100	80	20
	ПМ	+	+	+	+	-	80	80	0
ОО	Э	+	+	+	+	+	100	60	40
	АН	+	+	+	+	+	100	60	40
	ПМ	+	+	+	+	+	100	20	80
ЛП	Э	+	+	-	+	+	80	20	60
	АН	+	+	+	+	+	100	40	60
	ПМ	+	+	+	+	+	100	100	0
МТ	Э	+	+	+	+	+	100	60	40
	АН	+	+	+	+	+	100	60	40
МЛ	БМ	+	+	+	+	+	100	60	40
Среднее							97	55	42

Примечание. Здесь, а также в табл. 8, 10: «+» – прогноз оправдался, «-» – прогноз не оправдался.

Таблица 7

**Результаты расчета ледовых характеристик по зависимому ряду
для Охотского моря**

Характеристика	Пункт, район моря	Число лет наблюдений	ОБ метода, %	ОБ климатическая, %	ЭФ, %
СГДМ	М	79	87	66	21
	О	86	90	69	21
ПП	М	80	92	66	26
	О	83	92	84	8
ОО	М	79	91	72	19
	О	77	91	58	33
ЛП	М	79	95	70	25
	О	77	86	61	25
МТ	АЯ	70	91	73	18
МЛ	ОМ	61	92	66	26
Среднее		77	91	69	22

Примечание. Здесь, а также в табл. 8: М – Магадан; О – Охотск; АЯ – Аян; ОМ – Охотское море.

Таблица 8

**Результаты расчета ледовых характеристик по независимому
5-летнему ряду для Охотского моря**

Характеристика	Пункт, район моря	Ледовые сезоны					ОБ метода, %	ОБ климатическая, %	ЭФ, %
		2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016			
СГДМ	<i>М</i>	+	+	+	+	+	100	40	60
	<i>О</i>	+	+	+	+	+	100	40	60
ПП	<i>М</i>	+	+	+	+	+	100	60	40
	<i>О</i>	+	+	+	+	+	100	100	0
ОО	<i>М</i>	+	+	+	+	+	100	20	80
	<i>О</i>	+	+	+	+	-	80	20	60
ЛП	<i>М</i>	+	+	+	+	+	100	60	40
	<i>О</i>	+	+	+	+	-	80	40	40
МТ	<i>АЯ</i>	+	+	+	+	+	100	80	20
МЛ	<i>ОМ</i>	+	+	+	+	+	100	60	40
Среднее							96	52	44

Таблица 9

**Результаты расчета ледовых характеристик по зависимому ряду
для Татарского пролива**

Характеристика	Пункт, район моря	Число лет наблюдений	ОБ метода, %	ОБ климатическая, %	ЭФ, %
СГДМ	Советская Гавань	99	92	68	24
ПП		85	88	66	22
ОО		83	98	69	29
ЛП		81	94	65	29
МТ		71	92	75	17
МЛ	Пролив	61	97	62	35
Среднее		80	94	68	26

Таблица 8

**Результаты расчета ледовых характеристик по независимому
5-летнему ряду для Татарского пролива**

Характеристика	Пункт, район моря	Ледовые сезоны					ОБ метода, %	ОБ климатическая, %	ЭФ, %
		2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016			
СГДМ	Советская	+	+	+	+	+	100	60	40
ПП	Гавань	+	+	+	+	+	100	100	0
ОО		+	+	+	+	+	100	100	0
ЛП		+	+	+	+	+	100	100	0
МТ		+	+	+	+	+	100	100	0
МЛ	Пролив	+	+	+	+	+	100	100	0
Среднее							100	93	7

Расчеты ледовых характеристик по зависимому и независимо-му рядам дали удовлетворительные результаты. Средняя эффективность метода по зависимому ряду по всем элементам ледового режима и пунктам составила 23 %, по независимо-му 5-летнему ряду – 36 %. Высокая эффективность для последних 5 лет ряда наблюдений объясняется низкой климатической обеспеченностью для многих элементов ледового режима в эти годы.

На рис. 1 и 2 для примера представлены результаты расчета некоторых ледовых характеристик.

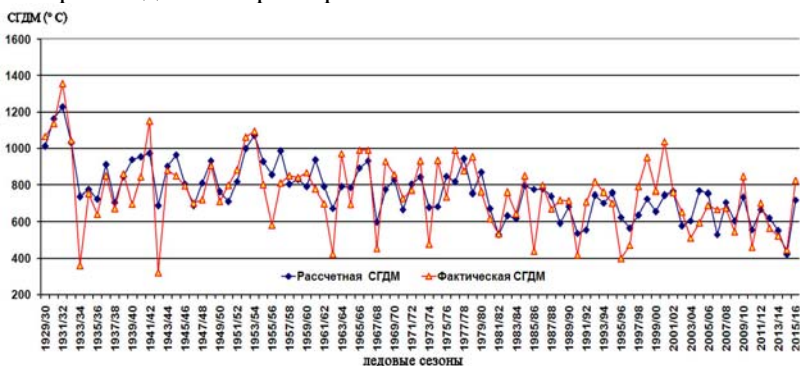


Рис. 1. Расчет СГДМ в Петропавловске-Камчатском по зависимому (1930–2011 гг.) и независимо-му (2012–2016 гг.) рядам.



Рис. 2. Расчет максимальной за ледовый сезон ледовитости Татарского пролива по зависимому (1952–2011 гг.) и независимо-му (2012–2016 гг.) рядам.

4. Основные влияющие на результат расчета предикторы

Опыт работы с большими рядами данных о ледовых характеристиках как европейских, так и дальневосточных морей показал, что с течением времени влияние отдельных предикторов в первых двух компонентах ансамблевого метода, характеризующих состояние термобарических полей, может меняться. Также могут выявляться новые неучтенные ранее предикторы, использование которых улучшает результаты расчета.

Для отслеживания происходящих изменений для каждого элемента прогноза в программе Microsoft Excel созданы таблицы, позволяющие после окончания ледового сезона определять, во-первых, не входящие в уравнения новые предикторы, для которых выявляются наибольшие коэффициенты корреляции с ошибками расчета, во-вторых, входящие в уравнения предикторы, слабо влияющие на результат расчета. Замена отдельных предикторов является частью работы по совершенствованию методики наряду с исключением ошибок и ликвидацией пропусков в рядах наблюдений.

Замене подвержены, как правило, предикторы, имеющие наименьшие весовые коэффициенты (B_n) в уравнениях. Основные же влияющие предикторы с высокими весовыми коэффициентами довольно устойчивы.

Говорить об устойчивости высокой эффективности долгосрочного прогноза, как показывает международная практика, весьма сложно. Однако работа по выявлению значимых предикторов полезна с научной точки зрения, поскольку позволяет определить влияние интенсивности термобарических процессов в отдельные месяцы, предшествующие ледовому сезону, на будущую ледовую ситуацию в море.

В табл. 11 и 12 приведены данные о трех наиболее «влиятельных» предикторах для каждой характеристики ледового сезона в первом и втором компонентах прогноза, при этом определен в процентах вклад суммы этих характеристик в конечный результат расчета по компоненте.

Таблица 11

**Вклад в результат расчета по первому компоненту,
характеризующему поле приземной температуры воздуха,
трех наиболее влиятельных предикторов**

Море, район моря или пункт наблюдений	Характеристика	r суммарный	n	Предиктор № 1	Предиктор № 2	Предиктор № 3	Вклад %
Эгвекинот	СГДМ	0,74	13	N_{Γ}	$T_B(V)$	$T_{ACx}(V)$	59
	ПП	0,56	13	N_{Γ}	$T_B(VIII)$	$T_{ACx}(VI)$	43
	ОО	0,76	12	N_{Γ}	$T_B(VI)$	$T_{ACx}(VIII)$	50
	ТЛ	0,70	11	$T_B(VI)$	$T_B(VII)$	$T_{ACx}(V)$	31
Анадырь	СГДМ	0,51	15	$\Delta T_2(VI)$	$T_B(V)$	$T_{ACx}(III)$	39
	ПП	0,63	11	N_{Γ}	$T_B(VII)$	$T_B(IX)$	43
	ОО	0,77	10	N_{Γ}	$T_B(I)$	$T_P(VIII)$	35
	ТЛ	0,77	9	$T_{Ip}(VIII)$	$\Delta T_2(VI)$	$T_{ACx}(VIII)$	43
П-Камчатский	СГДМ	0,60	10	N_{Γ}	$T_B(V)$	$\Delta T_3(IV)$	55
Петропавловский маяк	ПП	0,55	12	N_{Γ}	$T_B(V)$	$T_B(VI)$	65
	ОО	0,61	11	N_{Γ}	$T_B(V)$	$T_{ACx}(VII)$	33
Берингово море	Л	0,73	10	$T_B(VII)$	$T_B(V)$	$T_{ACx}(IX)$	18
Магадан	СГДМ	0,56	12	N_{Γ}	$T_B(II)$	$T_{Ip}(V)$	48
	ПП	0,64	12	N_{Γ}	$T_B(V)$	$T_B(IX)$	38
	ОО	0,73	13	N_{Γ}	$T_B(V)$	$T_{Ip}(VII)$	36
Охотск	СГДМ	0,58	13	N_{Γ}	$T_B(V)$	$T_{ACx}(VII)$	78
	ПП	0,54	12	$T_{Ip}(III)$	$T_{Ip}(VIII)$	$T_{ACx}(VI)$	48
	ОО	0,53	12	$T_{Ip}(VI)$	$T_B(V)$	$T_{Ip}(IX)$	13
Аян	ТЛ	0,54	10	$T_{Ip}(V)$	$T_B(VII)$	$T_{Ip}(VII)$	74
Охотское море	Л	0,71	13	$T_{Ip}(IX)$	$T_{ACx}(V)$	$T_{ACx}(VII)$	17
Советская гавань	СГДМ	0,68	12	N_{Γ}	$T_B(V)$	$\Delta T_2(VI)$	56
	ПП	0,70	15	N_{Γ}	$T_B(V)$	$T_{Ip}(VI)$	41
	ОО	0,76	14	N_{Γ}	$T_{ACx}(IV)$	$T_{ACx}(VIII)$	47
	ТЛ	0,64	12	N_{Γ}	$T_B(VII)$	$T_{Ip}(VIII)$	53
Татарский пролив	Л	0,70	13	$\Delta T_2(IX)$	$T_B(V)$	$T_{ACx}(VIII)$	36
Среднее		0,65	12				44

Примечание. Здесь, а также в табл. 12: римской цифрой обозначен номер месяца.

Таблица 12

Вклад в результат расчета по второму компоненту, характеризующему поле приземного давления, трех наиболее влиятельных предикторов (в %)

Море, район моря или пункт наблюдений	Характеристика	r суммарный	n	Предиктор № 1	Предиктор № 2	Предиктор № 3	Вклад %
Эгвекиноот	СГДМ	0,70	12	N_{Γ}	$P_{аз} (VIII)$	$P_{и} (IV)$	26
	ПП	0,61	12	$P_{и} (V)$	$P_{аз} (IV)$	$P_{и} (IX)$	26
	ОО	0,70	11	N_{Γ}	$P_{с} (VIII)$	$P_{с} (VI)$	57
	ТЛ	0,56	10	$P_{с} (VI)$	$P_{аз} (VI)$	$P_{ал} (IV)$	36
Анадырь	СГДМ	0,51	12	$P_{и} (VIII)$	$P_{аз} (IV)$	$P_{с} (VII)$	22
	ПП	0,65	11	$P_{и} (VII)$	$P_{аз} (IV)$	$P_{и} (IX)$	34
	ОО	0,70	10	N_{Γ}	$P_{аз} (VIII)$	$P_{с} (II)$	33
	ТЛ	0,60	8	$P_{с} (VIII)$	$P_{аз} (IV)$	$P_{ал} (II)$	43
П-Камчатский	СГДМ	0,58	12	N_{Γ}	$P_{с} (VII)$	$\Delta P_2(VIII)$	21
Петропавловский маяк	ПП	0,65	13	$P_{с} (VIII)$	$P_{аз} (IX)$	$P_{и} (VII)$	17
	ОО	0,63	13	$P_{и} (VII)$	$P_{и} (VIII)$	$P_{ал} (VIII)$	44
Берингово море	Л	0,62	10	$P_{и} (V)$	$P_{ал} (I)$	$P_{ал} (VII)$	32
Магадан	СГДМ	0,67	12	N_{Γ}	$P_{аз} (IV)$	$P_{аз} (IX)$	37
	ПП	0,64	11	N_{Γ}	$P_{и} (VII)$	$P_{и} (VIII)$	16
	ОО	0,62	11	N_{Γ}	$P_{аз} (VII)$	$P_{и} (VII)$	22
Охотск	СГДМ	0,68	11	N_{Γ}	$P_{аз} (IX)$	$P_{с} (VII)$	26
	ПП	0,58	13	$P_{и} (VIII)$	$P_{с} (VI)$	$P_{с} (III)$	40
	ОО	0,54	14	$P_{аз} (VI)$	$P_{аз} (VII)$	$P_{с} (I)$	18
Аян	ТЛ	0,66	11	$P_{и} (VI)$	$P_{ал} (I)$	$P_{с} (VI)$	22
Охотское море	Л	0,71	11	$P_{и} (VII)$	$P_{аз} (IV)$	$P_{с} (VII)$	32
Советская гавань	СГДМ	0,70	12	N_{Γ}	$P_{ал} (VII)$	$P_{ал} (VIII)$	43
	ПП	0,61	13	N_{Γ}	$P_{с} (VIII)$	$P_{с} (IX)$	28
	ОО	0,74	15	N_{Γ}	$P_{с} (VIII)$	$P_{ал} (V)$	38
	ТЛ	0,61	13	$P_{ал} (VIII)$	$P_{с} (V)$	$P_{с} (VII)$	26
Татарский пролив	Л	0,72	11	$P_{и} (V)$	$P_{с} (VII)$	$P_{с} (VIII)$	61
Среднее		0,64	12				32

Анализ табл. 11 и 12 показывает, что

– при средней длине ряда наблюдений 87 лет среднее число предикторов в уравнениях равно 12, что составляет 14 % от длины ряда;

– для первого компонента, характеризующего поле приземной температуры воздуха, средний коэффициент корреляции для всех элементов ледового режима равен 0,65, для второго компонента, характеризующей поле приземного давления, – 0,64;

– для первого компонента из 75-и выявленных предикторов самое большое количество пришлось на май, июнь и июль (47 % всех выявленных предикторов), для второго компонента – на июль и август (41 % всех выявленных предикторов);

– для первого компонента выявлено следующее ранжирование (по вкладам в %) влияния на ледовые процессы в дальневосточных морях трех наиболее значимых предикторов:

1) температура воздуха в беринговоморской воздушной массе (T_B) – 35 % (в т. ч. на майские и июньские значения приходится 21 % всех выявленных предикторов, на июльские и августовские – 8 %),

2) номер года (компенсирующий долю тренда, не учтенную состояние термобарического поля) – 21 %,

3) температура воздуха в воздушной массе Охотского моря (T_{ACx}) – 20 % (в т. ч. на июльские и августовские значения приходится 9 % всех выявленных предикторов),

4) температура воздуха в сибирской воздушной массе ($T_{Ир}$) – 16 % (в т. ч. на июльские и августовские значения приходится 7 % всех выявленных предикторов),

5) другие предикторы – 8 %;

– для второго компонента выявлено следующее ранжирование (в %) влияния на ледовые процессы в дальневосточных морях трех наиболее значимых предикторов:

1) давление в районе сибирского максимума (P_c) – 28 % (в т. ч. на июльские и августовские значения приходится 16 % всех выявленных предикторов),

2) давление в районе исландского минимума (P_u) – 21 % (в т. ч. на июльские и августовские значения приходится 12 % всех выявленных предикторов),

3) давление в районе азорского минимума ($P_{аз}$) – 20 % (в т. ч. на апрельские значения приходится 8 % всех выявленных предикторов, на июльские и августовские значения приходится 5 % всех выявленных предикторов),

4) давление в районе алеутского минимума (*Рал*) – 15 % (в т. ч. на июльские и августовские значения приходится 8 % всех выявленных предикторов),

5) номер года (компенсирующий долю тренда, не учтенную особенностями термобарического поля) – 15 %,

6) другие предикторы – 1 %.

Заключение

Таким образом, расчет ледовых характеристик ансамблевым методом для ряда пунктов дальневосточных морей по зависимому и независимому рядам дал удовлетворительный результат.

1. Средняя для всех пунктов эффективность метода по зависимым рядам составляет для элементов ледового режима:

– СГДМ – 21 % при обеспеченности 88 %;

– ПП – 18 % при обеспеченности 91 %;

– ОО – 26 % при обеспеченности 94 %;

– ЛП – 23 % при обеспеченности 92 %;

– МЛ – 29 % при обеспеченности 95 %;

– МТ – 22 % при обеспеченности 93 %.

2. Средняя для всех пунктов эффективность метода по независимым 5-летним рядам не ниже эффективности по зависимым рядам.

Анализ базы предикторов показал, что:

1. Вклад первых трех наиболее влиятельных предикторов в результат расчета для уравнений первого и второго компонентов методики прогноза составляет 44 и 32 % соответственно.

2. Наибольшее влияние на ледовые условия дальневосточных морей в предстоящую зиму оказывает состояние поля приземной температуры в мае-июле, поля приземного давления – в июле-августе.

3. Подтвердилось ожидаемое большое влияние на ледовые условия дальневосточных морей в предстоящую зиму летнего давления в районе Сибирского максимума, которое, однако, не превысило суммарного влияния азорского максимума и исландского минимума, что свидетельствует о действии дальних связей, а также о единстве термобарических процессов в планетарном масштабе.

4. Влияние давления в районе алеутского минимума оказалось наименее существенным по сравнению с районами других центров действия атмосферы, зато очень высоким оказалось влияние температуры воздуха в этом районе.

Список использованных источников

1. Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. – М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 286 с.

2. Абузяров З.К., Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. Морские прогнозы. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 320 с.

3. Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г. и др. Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 348 с.

4. Думанская И.О. Зависимость ледовитости Белого моря от макроциркуляционных атмосферных процессов // Труды Гидрометцентра России. – 2004. – Вып. 339. – С. 55–63.

5. Думанская И.О. Методика долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеоспектр. – 2009. – № 4. – С. 88–96.

6. Думанская И.О. Оценка возможности использования вероятностных характеристик дрейфующего льда и численной модели перераспределения льда в Белом море для гидрометеорологического обеспечения морских транспортных операций в условиях климатических изменений // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – № 77. – С. 128–142.

7. Думанская И.О., Котилевская А.М. Оценка возможности использования в современной практике ледового обслуживания мореплавания прогностических методик XX века на неарктических морях России // Труды Гидрометцентра России. – 2009. – Вып. 343. – С. 67–88.

8. Думанская И.О. Анализ влияния центров действия атмосферы на характер зим на морях европейской части России // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 56–82.

9. Думанская И.О. Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 83–104.

10. Думанская И.О. О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 11 – С. 64–76.

11. Думанская И.О. Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях, основанный на использовании статистического моделирования // Информационный сборник № 40 «Результаты

испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2013. – С. 41–63.

12. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий в Баренцевом море, Финском заливе и в северной части Каспийского моря, основанный на использовании статистического моделирования // Информационный сборник № 42 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2015. – С. 111–128.

13. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей европейской части России. – М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. – 605 с.

Поступила в издательство 08.08.2016 г.