

МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ НА БЕЛОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В соответствии с Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических прогнозов на 2011 год в ФГБУ «Гидрометцентр России» были проведены оперативные испытания нового метода долгосрочного прогноза ледовых условий. В качестве зависимых рядов для получения расчетных уравнений использовались наиболее полные ряды наблюдений за ледовыми характеристиками с начала организации наблюдений (различного для разных ледовых характеристик: например, ледовые фазы в Архангельске – с 1895 г., а ледовитость Белого и Азовского морей – с 1950 г.) до ледового сезона 2004-2005 гг. В качестве независимого ряда, принятого к испытаниям, использовались данные шести ледовых сезонов с 2005–2006 по 2010–2011 гг.

Введение

В Отделе морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» в течение многих лет составляется долгосрочный прогноз ледовых условий на российских морях на предстоящую зиму. Прогнозируется ряд характеристик по портам неарктических морей (в том числе Белого и Азовского морей с заблаговременностью от двух до восьми месяцев): сумма градусодней 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.

Основными в области долгосрочных ледовых прогнозов в настоящее время являются физико-статистические методы, опирающиеся на предположение о преемственности и цикличности процессов, происходящих в природе [1]. Несмотря на то, что все неарктические моря находятся в разных физико-географических районах, в их ледовом

режиме много общего: на всех морях наблюдается большая ледовая инерция; знаку аномалии ледовитости на одном море, как правило, соответствует такая же по знаку аномалия на других морях данного региона. Существует значимая корреляция (коэффициент корреляции $r = 0,6-0,8$) между ледовитостью и положением кромки льда, ледовитостью и толщиной льда. Ледовые процессы на всех морях связаны со спецификой макроциркуляционных атмосферных процессов, которые в свою очередь зависят от состояния центров действия атмосферы в месяцы, предшествующие ледовому сезону [4, 6].

Это делает возможным осуществление единого подхода к разработке метода долгосрочного ледового прогноза для всех неарктических морей. Попытка такого единого подхода была предпринята в Гидрометцентре СССР А.И. Каракашем в 1970-х гг. [2]. В 2008–2010 гг. была осуществлена проверка данного метода на независимом 25-летнем ряде наблюдений (1983–2007 гг.), которая не дала положительного результата. Это свидетельствует о том, что статистические связи не являются устойчивыми и нуждаются в постоянном обновлении, что объясняется прежде всего сменой макроциркуляционных эпох [3, 4]. В настоящее время происходят климатические изменения, которые обуславливают внесение определенных корректив в зависимости, полученные на основе эмпирико-статистических исследований в XX в. с использованием коротких рядов данных (20–30 лет). Такие ряды не дают возможности привлечения большого числа предикторов. Сложность изучаемых природных процессов заключается в том, что использование трех-четырёх предикторов может обеспечить устойчивость связи только на коротком отрезке времени. С другой стороны, с неограниченным увеличением числа аргументов коэффициент корреляции между рядами фактических и расчетных величин может увеличиваться с одновременным уменьшением его достоверности [3]. Таким образом, существует острая необходимость постоянного совершенствования таких методик долгосрочного прогноза ледовых условий в европейских морях России.

1. Используемые данные

Информационной основой испытываемого нового метода долгосрочного прогноза ледовых условий на неарктических морях являются данные электронного архива метеорологической и ледовой информации, созданного в лаборатории ледовых прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» в последние годы.

Архив включает:

– данные наблюдений за температурой воздуха у поверхности Земли и приземным давлением на морских гидрометеорологических станциях неарктических морей;

– данные наблюдений за температурой воздуха у поверхности Земли и приземным давлением в пунктах, расположенных в районах центров действия атмосферы (ЦДА): 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 ГМС;

– таблицы ледовитости неарктических морей.

Длина рядов данных о параметрах центров действия атмосферы составляет 110 лет. Ряды температуры воздуха у поверхности Земли на станциях «Архангельск» и «Кандалакша» (Белое море), «Ростов-на-Дону» (Азовское море) также охватывают 110 лет. Длина рядов наблюдений для ледовитости морей составила 60 лет, для толщины льда в портах – от 70 до 90 лет, для ледовых фаз и ледового периода в районах портов – от 70 до 110 лет.

2. Технология долгосрочного прогноза

В основу методики прогноза заложено предположение о том, что на будущую суровость зимы и значения ледовых характеристик в любом порту европейской части России 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.

Технология долгосрочного прогноза представляет собой ансамблевый метод, включающий три компонента для расчета ледовых параметров [5, 6, 9, 10]:

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

2. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования характеристик поля приземного давления над евроатлантическим 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 методики прогноза исследовалась связь характеристик ледового режима неарктических морей с параметрами атмосферных процессов:

– среднемесячными значениями приземной температуры воздуха, характеризующими сибирскую, причерноморскую, североатлантическую и беломорскую воздушные массы, и разностями этой температуры на фиксированных створах ΔT_1 и ΔT_2 (см. табл. 1);

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

Корреляционный анализ осуществлялся по данным девяти месяцев, предшествующих ледовому сезону (с января по сентябрь включительно) [7]. 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. Отфильтрованные предикторы обладают «метеорологической» памятью, наличие которой подтверждается достаточно значимой корреляцией.

Для морей европейской части России выбран единый набор предикторов (42 характеристики поля температуры и 39 характеристик поля давления). Уравнения для всех портов имеют аналогичный вид, отличаясь только весовыми коэффициентами. Число весовых коэффициентов, отличных от нуля, в каждом уравнении не превышает 20 % ряда рассчитываемой ледовой характеристики. Термическое и барическое воздействия включены в отдельные компоненты методики с целью облегчения выявления их системного влияния на будущую специфику ледовых процессов.

Если обозначить предикторы x_1, x_2, \dots, x_n , то линейное корреляционное уравнение может быть записано:

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

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 (сумма градусодней мороза, дата начала ледообразования, максимальная за ледовый сезон ледовитость моря, максимальная за ледовый сезон толщина льда, дата очищения моря ото льда).

В табл. 1 в качестве примера приведены весовые коэффициенты (B) и предикторы (x) для расчета СГДМ, определяющей суровость будущей зимы, по полю приземной температуры воздуха для трех портов.

В табл. 2 аналогично приведены весовые коэффициенты в уравнениях расчета СГДМ по полю приземного давления для тех же портов.

**Предикторы (x), характеризующие поле приземной температуры, и весовые коэффициенты
(B) в уравнениях расчета СГДМ для портов Белого и Азовского морей**

Предикторы	Весовые коэффициенты		
	Кандалакша	Архангельск	Ростов-на-Дону
<i>Номер года</i>	0	0	-0,075
Причерноморская воздушная масса			
$T_P(I)$	0	0	0,25
$T_P(III)$	0	0	0
$T_P(IV)$	0	0	0
$T_P(V)$	0,15	0	0,25
$T_P(VI)$	0	0	0
$T_P(VII)$	0	0	0
$T_P(VIII)$	-0,36	-0,55	-0,32
$T_P(IX)$	-0,23	-0,22	0,50
Беломорская воздушная масса			
$T_A(I)$	0,18	0,18	0
$T_A(II)$	0	0	0
$T_A(III)$	0	0	0
$T_A(IV)$	0	0	0
$T_A(V)$	-0,15	-0,24	0,44
$T_A(VI)$	0	0	0
$T_A(VII)$	-0,25	-0,24	0
$T_A(VIII)$	-0,38	-0,18	0
$T_A(IX)$	0	0	-0,56
Евроатлантическая воздушная масса			
$T_{СПб}(II)$	0	0	0
$T_{СПб}(V)$	0	0	0
$T_{СПб}(VI)$	0	0	-0,70
$T_{СПб}(VII)$	0	0	0
$T_{СПб}(VIII)$	0,40	0,70	0,44
$T_{СПб}(IX)$	-0,70	-0,70	0
Сибирская воздушная масса			
$T_{Ир}(I)$	0	0	0
$T_{Ир}(II)$	0	0	-0,32
$T_{Ир}(III)$	0	0	0
$T_{Ир}(IV)$	-0,30	-0,26	0
$T_{Ир}(V)$	0,25	0,38	0,35
$T_{Ир}(VII)$	0	-0,26	0,45
Меридиональный градиент температуры			
$\Delta T_1(I)$	-0,12	0	0
$\Delta T_1(II)$	-0,27	-0,24	0
$\Delta T_1(III)$	0	0	-0,45
$\Delta T_1(IV)$	0	-0,16	0
$\Delta T_1(V)$	0	0	0
$\Delta T_1(VIII)$	0	0	0
Зональный градиент температуры			
$\Delta T_2(I)$	0,18	0,20	0
$\Delta T_2(III)$	0,14	0,18	0
$\Delta T_2(VI)$	0,20	0,22	-0,48
$\Delta T_2(VII)$	-0,24	-0,14	0,14
$\Delta T_2(VIII)$	0,10	0,36	0
$\Delta T_2(IX)$	-0,46	-0,28	0,46

Примечание: Предикторы – среднемесячная приземная температура воздуха в пункте, характеризующем теплозапас воздушной массы: T_P – в Ростове - на - Дону, T_A – в Архангельске, $T_{СПб}$ – в Санкт-Петербурге, $T_{Ир}$ – в Иркутске; $\Delta T_1 = T_A - T_{СПб}$; $\Delta T_2 = T_{Ир} - (T_A + T_{СПб})/2$; римской цифрой обозначен месяц.

Предикторы (x), характеризующие поле приземного давления, и весовые коэффициенты (B) в уравнениях расчета СГДМ для портов Белого и Азовского морей

Предикторы	Весовые коэффициенты		
	Кандалакша	Архангельск	Ростов-на-Дону
Номер года	0	0	-0,075
Исландский минимум			
$Pu(I)$	0,07	0,10	0
$Pu(II)$	0,07	0,08	0,15
$Pu(III)$	0	0	-0,12
$Pu(IV)$	0	-0,12	0
$Pu(V)$	-0,08	-0,13	0,11
$Pu(VI)$	-0,18	-0,14	0
$Pu(VII)$	0,44	0,48	-0,28
$Pu(VIII)$	0	0	0
$Pu(IX)$	0	0,10	0
Сибирский максимум			
$Pc(I)$	-0,10	-0,16	0
$Pc(II)$	0	0	0
$Pc(III)$	0,22	0,12	0
$Pc(IV)$	-0,24	-0,30	0
$Pc(V)$	0	0	-0,70
$Pc(VI)$	0	0	-0,35
$Pc(VII)$	0	0	0
$Pc(VIII)$	-0,50	-0,65	-0,32
$Pc(IX)$	0,70	+0,70	0,70
Азорский максимум			
$Pa(I)$	0	0	0
$Pa(II)$	0	0	0,16
$Pa(III)$	0	0	0
$Pa(IV)$	0	0	-0,40
$Pa(VI)$	0	0	0
$Pa(VII)$	0	0	0
$Pa(VIII)$	0	0	-0,64
$Pa(IX)$	-0,09	0	0
Зональный перенос			
$\Delta P_1(I)$	-0,12	0	0
$\Delta P_1(II)$	0,12	0,17	0
$\Delta P_1(III)$	-0,20	-0,22	-0,56
$\Delta P_1(IV)$	0	0	0
$\Delta P_1(V)$	0	0	0
$\Delta P_1(VI)$	0	0	0
$\Delta P_1(VIII)$	0	0	0
$\Delta P_1(IX)$	-0,24	-0,22	-0,20
Меридиональный перенос			
$\Delta P_2(I)$	0	0	0
$\Delta P_2(V)$	-0,15	-0,18	0
$\Delta P_2(VII)$	0	0	0
$\Delta P_2(IX)$	0	0	0

Примечание. Предикторы – приземное давление в районе соответствующего центра действия атмосферы: Pu – в Рейкьявике, Pc – в Иркутске, Pa – в Понта-Делгада; $\Delta P_1 = P_c - (P_a + P_u)/2$; $\Delta P_2 = P_a - P_u$; римской цифрой обозначен месяц.

В табл. 1 и 2 представлен большой набор предикторов (x), работающих в уравнениях как для СГДМ, так и для всей линейки ледовых характеристик.

Предиктор может иметь нулевые весовые коэффициенты в уравнениях расчета СГДМ, но быть достаточно влиятельным в уравнениях для других характеристик ледового режима. Например, приземное давление в районе исландского минимума в августе $Pu(VIII)$ практически не оказывает влияние на будущую СГДМ в портах Белого и Азовского морей, что следует из табл. 2. Однако этот предиктор используется при расчете первого появления льда в Архангельске (с весовым коэффициентом $-0,30$).

Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых параметров на гармонические составляющие осуществлено для всех рядов СГДМ, значений ледовитости морей и ледовых фаз по 31 гармонике.

Исходя из предпосылки принципиальной возможности аналогового долгосрочного прогнозирования, в рамках разработки методики долгосрочного ледового прогноза было сделано предположение о том, что имеется некоторый глобальный период, в который вкладываются все гармоники. Иными словами, на абсциссе времени существуют такие узловые годы, когда ординаты всех гармоник обращаются в ноль.

Периоды циклов для гармоник определялись по ряду приземной температуры воздуха в Санкт-Петербурге, для которого имеется наибольшее число наблюдений. Разложению подвергался 200-летний ряд отклонений СГДМ от генерального тренда. При этом генеральный тренд также описывался длиннопериодной гармоникой, наиболее близко соответствующей полиномиальному тренду 2-го порядка. Для подтверждения универсальности работы гармоник было сделано разложение ряда СГДМ для Архангельска (192 года).

Мерой согласованности фактических и расчетных отклонений от генерального тренда являлся максимальный (пиковый), полученный в процессе перебора вариантов, коэффициент корреляции между значениями двух рядов – фактических отклонений СГДМ и соответствующих значений гармоники (G), описываемых уравнением вида:

$$G = A_g(\sin((Ni - N_0)2\pi/\Delta t) + C_g, \quad (2)$$

где Ni – номер текущего года; N_0 – номер узлового года (значение гармоники совпадает со значением генерального тренда); A_g и C_g – амплитуда и свободный член, определяемые по регрессии между значениями $\sin((Ni - N_0)2\pi/\Delta t)$ и фактическими данными; Δt – период цикла.

Из предположения об общности некоторого узлового года для всех гармоник и наличии глобального периода вытекает, что N_0 – величина, постоянная для всех гармоник, а значение Δt определяется из выражения:

$$\Delta t = \Delta T / m, \quad (3)$$

где ΔT – глобальный период; m – целые числа.

В результате проведения численных экспериментов было установлено, что наилучшие результаты разложения 200-летнего ряда СГДМ по Санкт-Петербургу получаются при установлении узлового года на начало современного летоисчисления, т.е. $N_0=0$, и задании глобального периода $\Delta T = 5044$.

В табл. 3 приведены параметры для 31 гармоник, сумма которых аппроксимирует СГДМ в Санкт-Петербурге и Архангельске, а также коэффициенты корреляции для гармоник (r).

Таблица 3

Параметры гармоник (m и Δt), полученные по рядам СГДМ в Санкт-Петербурге и Архангельске, и коэффициенты корреляции (r) для гармоник

Номер гармоники	m	Δt	r	
			Санкт-Петербург	Архангельск
1 (генеральный тренд)	5	1008,80	0,40	0,23
2	29	173,93	0,07	0,14
3	60	84,07	0,12	0,10
4	198	25,47	0,10	0,10
5	232	21,74	0,18	0,15
6	278	18,14	0,10	0,11
7	372	13,56	0,10	0,14
8	398	12,67	0,11	0,12
9	450	11,21	0,14	0,12
10	516	9,78	0,17	0,10
11	544	9,27	0,18	0,13
12	648	7,84	0,20	0,10
13	666	7,57	0,05	0,12
14	778	6,48	0,07	0,15
15	892	5,65	0,10	0,15
16	952	5,30	0,13	0,22
17	998	5,05	0,16	0,12
18	1024	4,92	0,14	0,11
19	1082	4,66	0,10	0,15
20	1154	4,37	0,13	0,18
21	1192	4,23	0,10	0,10
22	1280	3,94	0,18	0,08
23	1494	3,38	0,13	0,13
24	1640	3,08	0,17	0,19
25	1782	2,83	0,14	0,10
26	1876	2,69	0,10	0,11
27	1948	2,59	0,12	0,11
28	2098	2,40	0,17	0,19
29	2156	2,34	0,12	0,05
30	2234	2,26	0,24	0,16
31	2484	2,03	0,18	0,18
Суммарные r			0,80	0,74

В третьем компоненте методики суммы гармоник аппроксимируют значения СГДМ и ледовых характеристик морей европейской части России [5]. Коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по гармоникам, и соответствующими рядами фактических значений для разных ледовых характеристик и портов варьируют от 0,6 до 0,8.

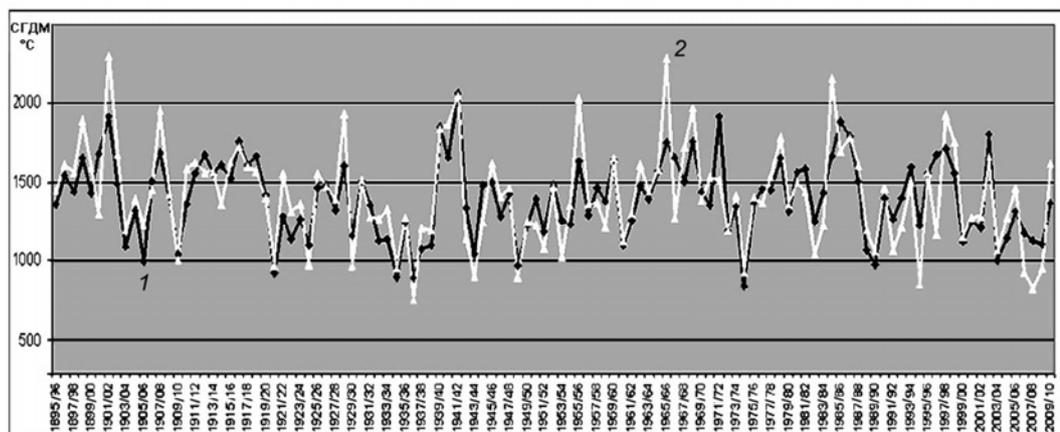
Следует обратить внимание, что прогноз в третьем компоненте осуществляется только по номеру года.

3. Результаты работы метода

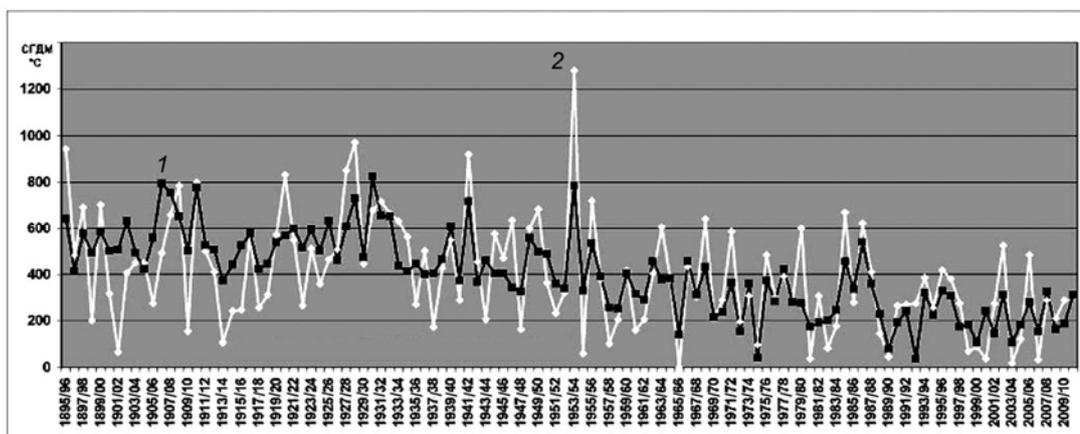
Ниже приведены результаты расчета ледовых условий с помощью ансамблевого (трехкомпонентного) метода для Белого и Азовского морей.

3.1. Прогноз СГДМ в портах Белого и Азовского морей

На рис. 1 представлены данные расчета СГДМ в Архангельске и Ростове-на-Дону.



а)



б)

Рис. 1. Результаты расчетов СГДМ в Архангельске (а) и Ростове-на-Дону (б) по зависимому (1896–2005 гг.) и независимому (2006–2010 гг.) рядам:
1 – прогностическая величина, 2 – фактическая величина.

В табл. 4 приведены данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду СГДМ для трех портов.

Таблица 4

Данные об обеспеченности и эффективности расчетов СГДМ по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду для портов Белого и Азовского морей

Кандалакша	Архангельск	Ростов-на-Дону
Длина зависимого ряда (лет)		
93	110	110
Коэффициент корреляции для зависимого ряда r		
0,78	0,80	0,74
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}, \%$		
22	19	17
Природная обеспеченность $Q_{пр}, \%$		
68	71	68
Среднее квадратическое отклонение σ		
313	305	239
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}, \%$		
90	90	85
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$		
6	5	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$		
4	2	4
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}, \%$		
33	50	33

Мерой обеспеченности расчета и оправдываемости прогноза СГДМ служит среднее квадратическое отклонение (σ), значения которого приведены в табл. 4.

В табл. 5 приведены фактические и рассчитанные данные СГДМ для шести сезонов.

Таблица 5

Фактические (Ф) и прогностические (П) значения СГДМ, оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей

Сезон	СГДМ в Кандалакше			СГДМ в Архангельске			СГДМ в Ростове-на-Дону		
	Ф	П	О	Ф	П	О	Ф	П	О
2005–2006	1243	1399	+	1464	1380	+	485	313	+
2006–2007	1186	1346	+	928	1232	+	31	264	+
2007–2008	947	1157	+	827	1069	+	289	326	+
2008–2009	1084	1372	+	955	1145	+	211	168	+
2009–2010	1506	1635	+	1619	1445	+	290	214	+
2010–2011	1650	1358	+	1754	1078	–	342	285	+

Примечание. Здесь, а также в табл.9, 10, 11, 13, 15 «+» – прогноз оправдался, «–» – прогноз не оправдался.

3.2. Прогноз ледовых фаз в портах Белого и Азовского морей

На рис. 2 в качестве примера представлены данные расчетов дат первого появления льда и окончательного очищения моря ото льда, а также продолжительности ледового периода в Мариуполе.

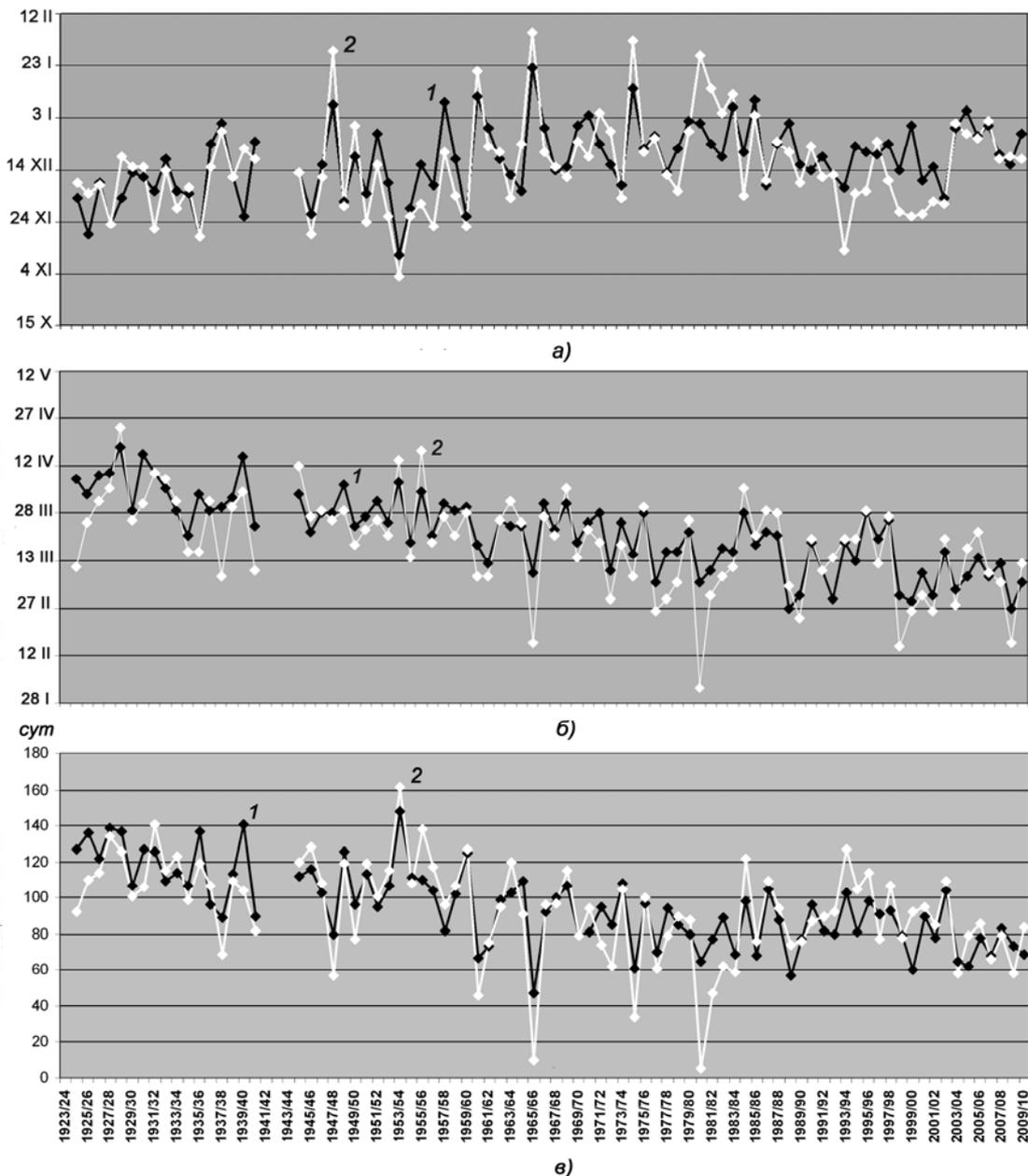


Рис. 2. Результаты расчетов ПП (а), ОО (б), ЛП (в) в Мариуполе:

1 – прогностическая величина, 2 – фактическая величина.

В табл. 6-8 приведены данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду дат первого появления льда, дат окончательного очищения акваторий портов ото льда, продолжительности ледового периода для трех портов.

Таблица 6

Данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду дат первого появления льда в портах Белого и Азовского морей

Кандалакша	Архангельск	Мариуполь
Длина зависимого ряда		
78	110	78
Коэффициент корреляции для зависимого ряда r		
0,80	0,70	0,76
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}$, %		
24	19	18
Природная обеспеченность $Q_{пр}$, %		
69	66	72
Среднее квадратическое отклонение σ для ПП		
18	10	18
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}$, %		
93	85	90
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$		
6	4	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$		
3	3	5
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}$, %		
50	17	17

Таблица 7

Данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду дат окончательного очищения ото льда акваторий портов Белого и Азовского морей

Кандалакша	Архангельск	Мариуполь
Длина зависимого ряда		
76	110	78
Коэффициент корреляции для зависимого ряда r		
0,88	0,67	0,81
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}$, %		
36	13	19
Природная обеспеченность $Q_{пр}$, %		
60	74	72
Среднее квадратическое отклонение σ для ОО		
12	8	15
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}$, %		
96	87	91
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$		
6	6	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$		
2	6	5
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}$, %		
67	0	17

Таблица 8

**Данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по
независимому ряду продолжительности ледового периода
в портах Белого и Азовского морей**

Кандалакша	Архангельск	Мариуполь
Длина зависимого ряда		
76	110	78
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}, \%$		
33	20	17
Природная обеспеченность $Q_{пр}, \%$		
63	66	74
Среднее квадратическое отклонение σ для ЛП		
27	13	27
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}, \%$		
96	86	92
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$		
6	5	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$		
2	4	4
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}, \%$		
67	16	33

В табл. 9–11 приведены фактические и рассчитанные данные ПП, ОО, ЛП для шести сезонов.

Мерой обеспеченности расчета и оправдываемости прогноза для ПП, ОО, ЛП служит среднее квадратическое отклонение (σ), значения которого для различных ледовых характеристик приведены в табл. 6–8.

Таблица 9

**Фактические (Ф) и прогностические (П) значения ПП,
оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей**

Сезон	ПП в Кандалакше			ПП в Архангельске			ПП в Мариуполе		
	Ф	П	О	Ф	П	О	Ф	П	О
2005-2006	8.12	8.12	+	1.12	18.11	-	26.12	27.12	+
2006-2007	15.11	27.11	+	28.10	15.11	-	2.1	31.12	+
2007-2008	3.12	27.11	+	12.11	15.11	+	18.12	20.12	+
2008-2009	28.11	11.12	+	24.11	16.11	+	19.12	16.12	+
2009-2010	7.12	5.12	+	8.11	11.11	+	18.12	28.12	+
2010-2011	15.11	23.11	+	10.11	7.11	+	11.1	27.12	+

Фактические (Ф) и прогностические (П) значения ОО,
оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей

Сезон	ОО в Кандалакше			ОО в Архангельске			ОО в Мариуполе		
	Ф	П	О	Ф	П	О	Ф	П	О
2005-2006	24.4	25.4	+	5.5	5.5	+	22.3	14.3	+
2006-2007	15.4	25.4	+	10.5	3.5	+	9.3	8.3	+
2007-2008	27.4	22.4	+	10.5	5.5	+	6.3	12.3	+
2008-2009	5.5	3.5	+	12.5	5.5	+	16.2	27.2	+
2009-2010	3.5	29.4	+	4.5	7.5	+	12.3	6.3	+
2010-2011	10.5	28.4	+	7.5	6.5	+	26.3	11.3	+

Таблица 11

Фактические (Ф) и прогностические (П) значения ЛП,
оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей

Сезон	ЛП в Кандалакше			ЛП в Архангельске			ЛП в Мариуполе		
	Ф	П	О	Ф	П	О	Ф	П	О
2005-2006	137	139	+	155	168	+	86	78	+
2006-2007	151	150	+	194	169	-	66	68	+
2007-2008	145	147	+	180	171	+	79	83	+
2008-2009	158	144	+	169	170	+	58	73	+
2009-2010	147	146	+	177	177	+	84	69	+
2010-2011	176	157	+	178	180	+	74	75	+

3.3. Прогноз максимальной за зиму ледовитости Белого и Азовского морей

На рис. 3 для примера представлены результаты расчета ледовитости Белого (северная часть) моря.

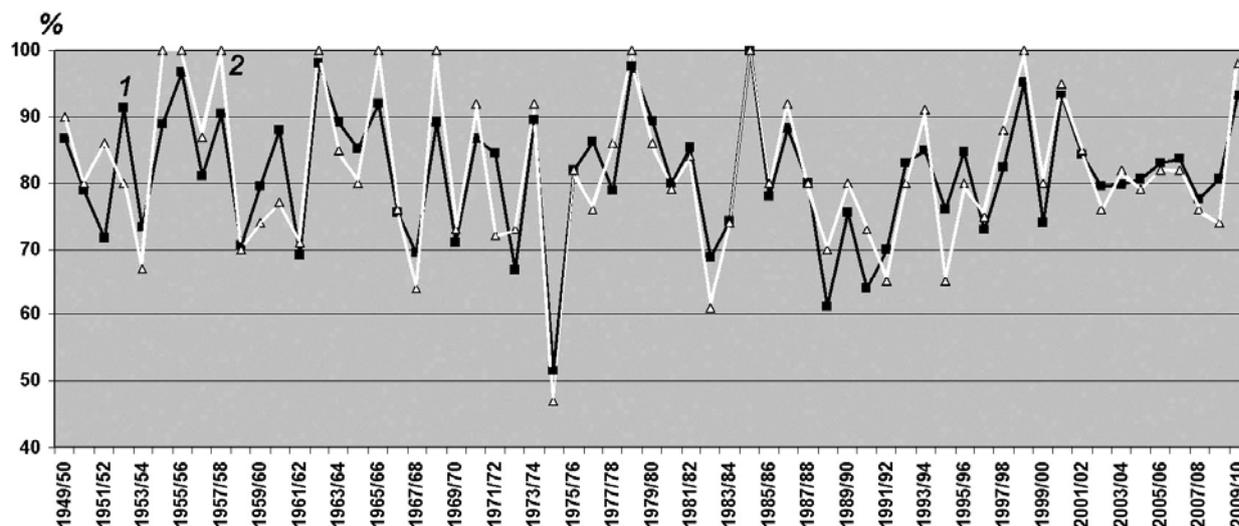


Рис. 3. Результаты расчета максимальной за ледовый сезон ледовитости Белого моря:

1 – прогностическая величина, 2 – фактическая величина.

В табл. 12 приведены данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду ледовитости Белого и Азовского морей.

Таблица 12

Данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду ледовитости Белого и Азовского морей

Белое море (Воронка)	Азовское море
Длина зависимого ряда	
56	56
Коэффициент корреляции для зависимого ряда r	
0,85	0,84
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}$, %	
25	28
Природная обеспеченность $Q_{пр}$, %	
71	68
Среднее квадратическое отклонение σ	
12	32
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}$, %	
96	96
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$	
6	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$	
5	5
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}$, %	
17	17

В табл. 13 приведены фактические и рассчитанные данные МЛ для шести сезонов. Мерой обеспеченности расчета и оправдываемости прогноза МЛ служит среднее квадратическое отклонение (σ), значения которого приведены в табл. 12.

Таблица 13

Фактические (Ф) и прогностические (П) значения МЛ, оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей

Сезон	МЛ в Кандалакше			МЛ в Архангельске		
	Ф	П	О	Ф	П	О
2005-2006	82	83	+	97	66	+
2006-2007	82	84	+	26	52	+
2007-2008	76	78	+	96	90	+
2008-2009	74	81	+	62	55	+
2009-2010	98	93	+	57	68	+
2010-2011	92	82	+	64	74	+

3.4. Прогноз максимальной за зиму толщины льда в портах Белого и Азовского морей

В табл. 14 приведены данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду максимальной за зиму толщины льда в портах.

Таблица 14

Данные об обеспеченности и эффективности расчетов по зависимому ряду и прогнозов по независимому ряду максимальной за зиму толщины льда в портах Белого и Азовского морей

Кандалакша	Архангельск	Мариуполь
Длина зависимого ряда		
73	92	79
Коэффициент корреляции для зависимого ряда r		
0,77	0,78	0,83
Эффективность расчета для зависимого ряда $F_{зав}, \%$		
21	19	32
Природная обеспеченность $Q_{пр}, \%$		
67	73	62
Среднее квадратическое отклонение σ		
12	14	18
Обеспеченность расчета для зависимого ряда $Q_{зав}, \%$		
88	92	94
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда (6 лет) по прогностическому методу $N_{пр}$		
4	6	6
Число оправдавшихся случаев для независимого ряда по климату $N_{кл}$		
2	6	5
Эффективность расчета для независимого ряда $F_{незав}, \%$		
34	0	17

В табл. 15 приведены фактические и рассчитанные данные МТ для шести сезонов. Мерой обеспеченности расчета и оправдываемости прогноза МТ служит среднее квадратическое отклонение (σ), значения которого приведены в табл. 14.

Таблица 15

Фактические (Ф) и прогностические (П) значения МТ, оправдываемость (О) прогнозов для портов Белого и Азовского морей

Сезон	МТ Кандалакша			МТ Мудьюг			МТ Мариуполь		
	Ф	П	О	Ф	П	О	Ф	П	О
2005-2006	67	71	+	66	71	+	39	29	+
2006-2007	48	62	-	58	71	+	0	3	+
2007-2008	42	54	+	59	67	+	35	37	+
2008-2009	55	66	+	61	54	+	27	17	+
2009-2010	82	82	+	79	68	+	31	19	+
2010-2011	93	65	-	80	74	+	20	19	+

Выводы

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

- сумма градусодней мороза (СГДМ) – 19 % при обеспеченности 88 %;
- первое появление льда (ПП) – 20 % при обеспеченности 89 %;
- дата окончательного очищения ото льда (ОО) – 23 % при обеспеченности 91%;
- продолжительность ледового периода (ЛП) – 23 % при обеспеченности 91 %;
- максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость моря (МЛ) – 26 % при обеспеченности 96 %;
- максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда (МТ) – 24 % при обеспеченности 91 %.

2. Средняя эффективность прогнозов по независимому 6-летнему ряду (с ледового сезона 2005-2006 гг. по сезон 2010-2011 гг.):

- сумма градусодней мороза (СГДМ) – 39 % при обеспеченности 94 %;
- первое появление льда (ПП) – 28 % при обеспеченности 89 %;
- дата окончательного очищения ото льда (ОО) – 26 % при обеспеченности 100 %;
- продолжительность ледового периода (ЛП) – 35 % при обеспеченности 94 %;
- максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость моря (МЛ) – 17 % при обеспеченности 100 %;
- максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда (МТ) – 17 % при обеспеченности 89 %.

Заключение

Таким образом, расчет ледовых характеристик ансамблевым методом для ряда пунктов неарктических морей по зависимому и независимому рядам дал удовлетворительный результат. Тем не менее метод нуждается в дальнейшем совершенствовании: включении в уравнения новых значимых предикторов, фильтрации используемых предикторов.

Ряд полученных уравнений в совокупности является статистической моделью эволюции ледяного покрова неарктических морей. Поскольку во всех уравнениях весовые коэффициенты нормированы единообразно, т.е. от 0 до 0,7 по абсолютной величине, то пространственное распределение их значений при широкой географии пунктов, для которых осуществляется расчет, дает объективную картину влияния того или иного предиктора на конкретную ледовую характеристику. Следовательно, данный подход может быть использован в качестве метода исследования формирования различных тенденций в

процессе эволюции ледового покрова на неарктических морях. В статье [8] приведены результаты анализа пространственного и временного влияния наиболее значимых предикторов на характер зим на морях европейской части России, различные ледовые характеристики. Такой подход позволяет выявить причинно-следственные связи в процессе воздействия термобарических полей на характеристики будущего ледового сезона и дать количественную оценку активности этих связей.

В решении ЦМКП от 14 декабря 2011 г. отмечено, что испытанный метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях обеспечивает прогнозирование ряда характеристик по портам Белого и Азовского морей с заблаговременностью от 2 до 8 месяцев.

ЦМКП одобрила результаты испытаний метода и рекомендовала ФГБУ «Гидрометцентр России» включить данный метод в практику составления ледовых прогнозов в качестве основного метода.

Список литературы

1. *Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С.* Оперативное океанографическое обслуживание. – Обнинск: ООО «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.