

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДИК XX ВЕКА В СОВРЕМЕННОЙ ПРАКТИКЕ ЛЕДОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МОРЕПЛАВАНИЯ НА НЕАРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ РОССИИ**

Даже на частично замерзающих морях, к которым относятся неарктические моря (Белое, Балтийское, Черное, Азовское, Каспийское, Японское, Охотское, Берингово), ледовая обстановка бывает сложной и требует специализированного гидрометеорологического и ледового обслуживания. Современная технология такого обслуживания в ледовый период основана на реализации комплексного подхода, включающего использование климатических представлений, данных гидрометеорологических станций (ГМС), спутниковой и прогностической информации.

Для решения стратегических навигационных вопросов (планирование морских операций в ледовый период, определение сроков начала и окончания зимней навигации, оптимизация использования ледоколов) большое значение имеет учет возможных ледовых условий в предстоящую навигацию. Такие вопросы обсуждаются и решаются на уровне морских администраций портов и судоходных компаний задолго до начала ледового периода и требуют использования долгосрочного ледового прогноза (заблаговременностью от 15 сут до 2 мес и более).

Для долгосрочного ледового прогнозирования используются преимущественно физико-статистические методы. При этом из многообразия факторов, определяющих интенсивность или сроки наступления того или иного ледового явления, необходимо выбрать те факторы, которые являются главными для развития ледового явления в данное время и в данном районе моря. Прогнозы ледовых явлений основываются на учете составляющих теплового баланса, климатических особенностей региона и влияния атмосферных процессов. Перед началом разработки прогностической методики необходимо проанализировать относительную роль факторов, предшествующих ледовому явлению, с учетом принадлежности к той или иной макроциркуляционной эпохе, сезону года и местным условиям.

*Прогноз осенних ледовых явлений*, процессов ледообразования, начинается с того момента, когда вода в результате выхолаживания достигает температуры кристаллизации льда. Это наступает тем скорее, чем больше теплоотдача воды (определяемая, прежде всего, температурой воздушной массы, находящейся над акваторией

моря) и чем меньше теплонакопление за предшествующий весенне-летний период (определяемое температурой воды). В свою очередь, температура воздушной массы определяется особенностями макроциркуляции атмосферы и океана, интенсивностью и взаиморасположением центров действия атмосферы (ЦДА) и т.д. Именно эти факторы необходимо учесть при разработке прогноза осенних ледовых явлений.

*Прогноз зимних ледовых процессов* (нарастания толщины и увеличения количества льда) учитывает, прежде всего, два основных фактора: температуру воздуха и режим ветра. На суммарный результат ледонакопления к определенному моменту времени влияет сумма отрицательных температур воздуха, накопленная от дня перехода температуры воздуха через 0 °С к отрицательным значениям до дня, на который прогнозируется данная ледовая характеристика (даты появления льда, достижения льдом определенной толщины и т.д.). Эту величину принято называть суммой градусодней мороза СГДМ ( $\Sigma(-t_a)$ ).

Для европейской территории по 120-летнему периоду наблюдений были рассчитаны интервалы критериев суровости зим по суммам градусодней мороза (°С).

Для Белого моря по данным Архангельска:

- мягкая зима > -1180 °С,
- умеренная зима от -1180 до -1740 °С,
- суровая зима < -1740 °С.

Для Финского залива по данным Санкт-Петербурга:

- мягкая зима > -470 °С,
- умеренная зима от -470 °С до -970 °С,
- суровая зима < -970 °С.

Для Азовского моря по данным Геническа:

- мягкая зима > -90 °С,
- умеренная зима от -90 °С до -330 °С,
- суровая зима < -330 °С.

Для Азовского моря по данным Ростова на Дону:

- мягкая зима > -260 °С,
- умеренная зима от -260 °С до -560 °С,
- суровая зима < -560 °С.

За 120-летний период на Белом море была выявлена 21 суровая зима и 23 мягких зимы, на Финском заливе – 22 суровых и 23 мягких зимы, на Азовском море – 29 суровых и 35 мягких зим.

Кроме увеличения мощности ледяного покрова в течение всего ледового периода происходит перераспределение таких площадных характеристик дрейфующего льда, как ледовитость моря и сплоченность льда.

**Прогноз весенних ледовых процессов** предсказывает время наступления различных фаз разрушения ледового покрова, которое начинается с того момента, когда тепловой баланс поверхности моря становится положительным. С течением времени инсоляция увеличивается, и таяние льда активизируется. Скорость таяния зависит от температуры воздуха над акваторией моря и мощности ледяного покрова, для характеристики которой обычно используются ледовитость и толщина льда. Чем интенсивнее идет таяние льда, тем раньше происходит вскрытие и очищение моря ото льда. Степень ледонакопления моря может быть охарактеризована также суммой градусодней мороза.

При разработке методов долгосрочного прогноза ледовых условий должны учитываться крупномасштабные процессы взаимодействия океана и атмосферы, а также существующие в природе длиннопериодные циклические колебания.

При статистическом подходе к проблеме долгосрочного прогнозирования, как отмечают прогнозисты-практики, нужно использовать простые прогностические зависимости, если они не противоречат физическим представлениям о процессе [6]. Применение в уравнении большого количества предикторов крайне усложняет процесс отслеживания влияния изменчивости каждого из них на результат расчета. Поэтому имеет смысл ограничиваться 2-3 основными предикторами.

В качестве характеристик, оказывающих влияние на ледовые процессы, обычно используются температура воздуха, воды за различные периоды, давление в характерных точках либо разность давления на оптимальных створах, характеризующих направление и интенсивность воздушных переносов.

Ниже приведены типичные уравнения для расчета сроков первого ( $D_{\text{пп}}$ ) и устойчивого ( $D_{\text{уп}}$ ) появления льда в Архангельске, полученные в Северном УГМС по 20-летним рядам наблюдений для 60-80-х гг. XX века [6]:

$$D_{\text{пп}} = 0,06t_{w10/10} + 2,25t_{w15/10} + 0,29Dt_0 - 1,34Dt_{10-1} + 0,23t_{10-2} + 0,99\Delta t_{10} + 17,5 \quad (1)$$

$$D_{\text{пп}} = 0,06t_{w10/10} + 2,32t_{w15/10} + 0,30Dt_0 - 0,32t_{9-3} - 1,27t_{10-1} + 0,26\Delta t_{10-2} + 1,04\Delta t_{10} + 25,0, \quad (2)$$

$$D_{\text{уп}} = 6,17t_{w\text{max}} - 0,1t_{w10/10} + 0,14t_{w15/10} + 0,64Dt_0 - 0,9t_{9-3} + 1,66t_{10-1} - 0,68\Delta t_{10-2} + 0,73\Delta t_{10}, \quad (3)$$

где  $Dt_0$  – дата перехода температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$  к отрицательным значениям;

$t_{10-1}$  – температура воздуха в первой декаде октября;

$t_{w\text{max}}$  – максимальная температура воды,  $t_{w10/10}$  – температура воды 10 октября;

$\Delta t_{10}$  – отклонение от нормы среднемесячной температуры воздуха в октябре;

$\Delta t_{10-2}$  – отклонение от нормы средней декадной температуры воздуха во второй декаде октября.

Начало отсчета дат – от 21 октября. Средняя заблаговременность полученных зависимостей – менее 10 дней. Анализ уравнений множественной корреляции выявил следующее.

1. Частные коэффициенты корреляции предикторов, входящих в уравнения, с прогнозируемыми датами составляют 0,3-0,4.
2. Суммарные коэффициенты корреляции по зависимому ряду – 0,85-0,90.
3. Наибольшими оказались коэффициенты корреляции для связи сроков начала ледообразования с датами перехода температуры воздуха через 0 °С (0,87) и аномалией среднемесячной температуры воздуха в октябре (0,82). Причем, эти коэффициенты по своим значениям вполне сопоставимы с суммарными, что ставит под сомнение необходимость столь громоздких вычислений.

Как отмечают специалисты Северного УГМС, все значения предикторов при долгосрочном метеорологическом прогнозе имеют низкую оправдываемость, а фактические величины дают малую заблаговременность [6].

Для Белого моря также было установлено:

- изменчивость осенних ледовых фаз (60-65 дней) значительно больше изменчивости весенних ледовых фаз (15-20 дней);
- преемственность в районировании между осенними, зимними и весенними процессами отсутствует, однако она существует между ледовыми фазами каждого из указанных процессов;
- существует синхронность межгодовых колебаний ледовых фаз у различных групп станций [6].

В методической литературе подробно описаны существующие методы прогноза ледовых явлений, разработанные во второй половине XX века [1, 5]. В настоящее время используются найденные в то время подходы к решению прогностических задач. Однако намечаются и новые тенденции, определяемые пониманием неустойчивости статистических зависимостей при смене макроциркуляционных эпох [3].

При разработке методов долгосрочных прогнозов принято придерживаться представлений о преемственности, инерции, аналогичности и цикличности атмосферных и гидрологических процессов. Например, достаточно четко прослеживается преемственность от предзимья к зиме. Замечено, что меридиональным процессам в январе-феврале, обуславливающим частые вторжения холодного воздуха на европейскую территорию, предшествуют меридиональные процессы в октябре-ноябре, и, напротив, преобладание

западной циркуляции в октябре-ноябре влечет за собой преобладание этой же циркуляции в зимние месяцы. Инерционность обеспечивают устойчивые процессы в океане и атмосфере, например, малоподвижный зимний Сибирский антициклон провоцирует длительное поступление холодного воздуха на акватории южных морей России. Большая устойчивость температурных аномалий в океане оказывает влияние на температуру и влагосодержание воздушных масс, движущихся на материк [5].

Развитие синоптических процессов в масштабах длительного периода времени (группа лет, год, сезон) и на обширных пространствах (например, европейская территория России) позволяет выявить крупномасштабные процессы. В связи с этим необходимо установить пространственные связи между метеорологическими и ледовыми параметрами разных морей.

Следует сказать, что климатический анализ и долгосрочный прогноз понятия очень сближенные. Ведь фактически, вероятностный прогноз – это самый надежный вид статистического долгосрочного прогноза. При этом для разработки любого статистического прогноза в современных условиях требуется хорошо сформированный электронный архив, включающий как табличные данные наблюдений на ГМС, так и систематизированную визуальную информацию (карты, снимки, ледовые разведки). В связи с этим в Гидрометцентре России осуществляется формирование электронного ледового архива по единой схеме для всех российских морей.

В конце сентября Гидрометцентр России прогнозирует для неарктических морей на ледовый сезон следующие ледовые параметры:

- начало ледообразования;
- максимальную за ледовый сезон ледовитость (положение кромки);
- максимальную за зиму толщину льда по пунктам;
- очищение моря ото льда;
- продолжительность ледового сезона.

Однако в последние десятилетия возникли проблемы, связанные с ненадежной работой прежних статистических зависимостей.

Сегодня все мы являемся свидетелями климатических изменений. В связи с изменением характера погоды на акваториях морей меняется и характер ледовых условий на этих морях [4]. Эти перемены связаны, прежде всего, со сменой макроциркуляционных эпох (МЦЭ), для которых особенности динамики воздушных масс могут быть количественно оценены с помощью классификации, разработанной Г. Я. Вангенгеймом и А. А. Гирсом для евро-атлантического сектора [2].

Главной особенностью зональной (западной) циркуляции  $W$  являются наблюдающиеся в толще тропосферы волны малой амплитуды, которые быстро смещаются с запада на восток, что выражается в движении в этом направлении и наземных барических образований. При форме  $E$  над европейской территорией России наблюдается высотный гребень (заток теплого воздуха из умеренных широт в высокие по его западной периферии), а при форме  $C$  – ложбина (заток холодного воздуха из высоких широт). При межширотном обмене массой, количеством движения и энергией, характерном для меридиональных форм  $E$  и  $C$ , высотные гребни распространяются далеко на север, а ложбины – на юг. Наличие меридиональных составляющих циркуляции атмосферы обуславливает междуширотный обмен массой, количеством движения и энергией.

Всего к настоящему времени за 120-летний период наблюдений выделено 7 макроциркуляционных эпох, возраст каждой из которых от 9 до 26 лет (с конца XIX века по 1902 г. – эпоха  $C$ , 1903-1928 гг. – эпоха  $W$ , 1929-1939 гг. – эпоха  $W+E$ , 1940-1948 гг. – эпоха  $C$ , 1949-1965 гг. – эпоха  $E+C$ , 1966-1990 гг. – эпоха  $E$ , 1991-2005 гг. – эпоха  $W+E$ ).

Для российских морей в период последней МЦЭ характерно:

- повышение повторяемости штормов в безледный период;
- повышение повторяемости легких ледовых условий;
- нетипичность развития ледовых условий по отношению к стереотипам 50-80-х гг.

[4].

Удалось выявить различные тенденции в развитии ледовых процессов европейских морей (Азовском, Белом, Балтийском), зависящие от принадлежности периода наблюдений к той или иной МЦЭ.

В табл. 1 приведена повторяемость суровых и мягких зим на Белом море, в Финском заливе и на Азовском море для различных МЦЭ за 120-летний период наблюдений.

Анализ таблицы свидетельствует о том, что на этих морях максимальная повторяемость суровых зим зафиксирована для меридиональной эпохи  $C$  1940-1948 гг. (33-44 %) и для 80-90-х гг. XIX века (35-47 %), также пришедшихся, предположительно, на эпоху  $C$ . В эпохи  $W+E$  повторяемость суровых зим оказалась минимальной: для периода 1929-1939 гг. – 9-18 %, для периода 1991-2005 гг. – 0-13 %.

Повторяемость мягких зим на европейских морях России в эпохи  $C$  составляет 6-20 %, а в другие эпохи может достигать более 40 %.

Для эпохи  $E$  на Балтийском море характерна низкая повторяемость суровых зим и сравнительно высокая повторяемость мягких зим (24 %). Повторяемость мягких зим в эту эпоху на Азовском море очень высокая (32 %), на Белом море – значительно ниже (16 %).

Необходимо также отметить очень высокую повторяемость мягких зим на всех морях в последнюю эпоху W+E – 33-47 %. В Финском заливе суровые зимы в последнюю МЦЭ не наблюдались.

Таблица 1

**Повторяемость суровых и мягких зим на европейских морях России  
для различных МЦЭ**

Период	Эпоха	Число суровых зим	Повторяемость суровых зим (%)	Число мягких зим	Повторяемость мягких зим (%)
Белое море					
1885-1902	С	8	47	1	6
1903-1928	W	1	4	4	15
1929-1939	W+E	1	9	3	22
1940-1948	С	3	33	2	20
1949-1965	E+C	1	6	4	24
1966-1990	Е	5	20	4	16
1991-2005	W+E	2	13	5	33
Всего зим		21		23	
Финский залив					
1885-1902	С	6	35	2	11
1903-1928	W	4	15	2	8
1929-1939	W+E	2	18	2	18
1940-1948	С	4	44	1	11
1949-1965	E+C	3	18	3	18
1966-1990	Е	3	12	6	24
1991-2005	W+E	0	0	7	47
Всего зим		22		23	
Азовское море					
1885-1902	С	6	40	3	18
1903-1928	W	7	27	7	27
1929-1939	W+E	2	18	2	18
1940-1948	С	3	33	1	11
1949-1965	E+C	5	29	7	41
1966-1990	Е	5	20	8	32
1991-2005	W+E	1	7	7	47
Всего зим		29		35	

Исследование проходит в рамках совершенствования метода долгосрочного прогноза ледовых условий на неарктических морях. Крайне важно, что были проверены многие существующие статистические связи, составляющие основу любого долгосрочного прогноза. Прежде всего, был оценен метод долгосрочного прогноза ледовитости, максимальной за зиму толщины льда и продолжительности ледового сезона, разработанный в 80-х гг. прошлого века учеными Гидрометцентра, и сделан вывод о том, что он работает в настоящее время с низкой эффективностью и требует модернизации.

Ученые прошлого века, конечно, понимали, что статистические зависимости имеют ограничения по «срокам годности». Но ряды были настолько малы, а

вычислительные средства настолько скудны, что расчеты уравнений регрессии на основе множественной корреляции были очень трудоемкими. Сейчас прогнозисты подошли к пониманию того, что уравнения должны обновляться с определенной периодичностью (например, период может быть равен средней продолжительности макроциркуляционного процесса). При этом возможна замена не только весовых коэффициентов, но и самих предикторов.

Ниже приведены результаты корреляционного анализа связей между суммами градусо-дней мороза над акваториями европейских морей и характеристиками приземных барических полей в центрах действия атмосферы (Исландский минимум – Рейкьявик, Сибирский максимум – Иркутск и Азорский максимум – Понта Делиада). Было предположено, что эти характеристики должны оказывать существенное влияние на развитие атмосферных процессов над Белым, Балтийским и Азовским морями.

Были исследованы семь предполагаемых предикторов: среднемесячные значения давления в ЦДА, разности этих давлений и комплексный барический показатель, характеризующий интенсивность зонального потока. Были определены коэффициенты корреляции между суммой градусо-дней мороза в пунктах, характеризующих термический режим Белого, Балтийского и Азовского морей и характеристиками в районах ЦДА. Расчет осуществлялся за 12 мес, предшествующих ледовому сезону по 120-летнему ряду наблюдений с разбивкой по МЦЭ.

В табл. 2-4 приведены наиболее значимые собственные коэффициенты корреляции ( $K \geq 0,4$ ) для связи суммы градусо-дней мороза в Архангельске, Санкт-Петербурге, Ростове-на-Дону с характеристиками ЦДА в различные МЦЭ. Данные по повторяющимся эпохам С и эпохам W+E объединены в единые ряды. Таким образом, ряд лет для двух эпох С составил 26 лет, для эпохи W – 26 лет, для двух эпох W+E – 27 лет, для эпохи E+C – 17 лет, для эпохи E – 24 года.

В табл. 5 приведены максимальные по величине собственные коэффициенты корреляции, характеризующие связь между среднемесячной температурой воздуха в пункте наблюдений в месяцы, предшествующие ледовому периоду, и сезонной суммой градусодней мороза в Архангельске, Санкт-Петербурге и Ростове на Дону.

Анализ таблиц 2-5 показывает, что для разных эпох и для разных морей далеко не всегда совпадают предикторы, значения которых следует закладывать в прогностические уравнения, т. е. если мы будем использовать их в уравнениях множественной корреляции, то весовые коэффициенты будут различными для различных эпох.



Таблица 2

**Коэффициенты корреляции для связи суммы градусодней мороза  
в Архангельске с характеристиками ЦДА в различные МЦЭ**

Месяц	$P_{и}$	$P_{а}$	$P_{с}$	$P_{с-P_{и}}$	$P_{с-P_{а}}$	$P_{а-P_{и}}$	$P_{с} - \frac{P_{а} + P_{и}}{2}$
<b>Эпоха С</b>							
I		0,43	0,43				
IV	-0,55			0,63			0,64
IX		0,56			-0,43		
<b>Эпоха W</b>							
VII	-0,50					0,53	
VIII				0,43			0,43
<b>Эпоха W+E</b>							
III							0,46
V		0,45				0,40	
VIII		-0,40					
IX					-0,40	0,40	
<b>Эпоха E+C</b>							
II				0,44			0,44
III		0,46	-0,61	-0,43	-0,59		
VII			0,53		0,46		
VIII			0,41				
IX				0,40	0,44		
XI			0,42				
<b>Эпоха E</b>							
II	-0,47					0,44	
VI		-0,44			0,50		
IX	-0,40						

**П р и м е ч а н и е.** Здесь, а также в табл. 3 и 4:

$P_{и}$  – приземное давление в районе Исландского минимума;

$P_{а}$  – приземное давление в районе Азорского максимума;

$P_{с}$  – приземное давление в районе Сибирского максимума;

$P_{с-P_{и}}$  – разность давлений районов Сибирского максимума и Исландского минимума;

$P_{с-P_{а}}$  – разность давлений районов Сибирского максимума и Азорского максимума;

$P_{а-P_{и}}$  – разность давлений районов Азорского максимума и Исландского минимума;

$P_{с} - \frac{P_{а} + P_{и}}{2}$  – комплексный показатель, характеризующий энергию зонального потока.

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции для связи суммы градусодней мороза в Санкт-Петербурге с характеристиками ЦДА в различные МЦЭ**

Месяц	$R_{Pi}$	$R_{Pa}$	$R_{Pc}$	$R_{c-Pi}$	$R_{c-Pa}$	$R_{a-Pi}$	$R_{c - \frac{Pa + Pi}{2}}$
<b>Эпоха С</b>							
I			0,40				
II			0,40				
IV	-0,65		0,42	0,75		0,50	0,65
IX		0,40			-0,50		
<b>Эпоха W</b>							
II				0,44			
XII						0,51	
<b>Эпоха W+E</b>							
III			0,48				
IX				0,44		0,51	
X		0,48					
<b>Эпоха E+C</b>							
II							0,42
IV							-0,48
VII			0,47		0,43		
VIII	0,44					-0,45	
IX			0,51		0,61		
<b>Эпоха E</b>							
II	-0,45	0,40		0,42	-0,44	0,53	
X				-0,44			-0,44

Таблица 4

**Коэффициенты корреляции для связи суммы градусодней мороза в Ростове на Дону с характеристиками ЦДА в различные МЦЭ**

Месяц	$R_{Pi}$	$R_{Pa}$	$R_{Pc}$	$R_{c-Pi}$	$R_{c-Pa}$	$R_{a-Pi}$	$R_{c - \frac{Pa + Pi}{2}}$
<b>Эпоха С</b>							
II			0,47				
III					0,51		
IX	-0,51					0,63	
X	-0,45					0,50	
<b>Эпоха W</b>							
III		-0,53			0,44		
X		0,41					
<b>Эпоха W+E</b>							
IX	-0,50			0,40		0,47	
X		0,55			-0,60		-0,40
<b>Эпоха E+C</b>							
III		-0,44	0,40		0,51		0,63
IV			-0,65		-0,65		-0,56
VIII					-0,40		
XI	0,43		-0,40	-0,55			-0,59
<b>Эпоха E</b>							
III			0,40				0,57
V		-0,50	0,48		0,57		
VIII		-0,40		0,57			0,53
XI	0,49					-0,52	-0,40

**Коэффициенты корреляции для связи суммы градусодней мороза в Архангельске (А), Санкт-Петербурге (СПб) и Ростове на Дону (Р) со среднемесячной температурой воздуха в пункте наблюдений**

Порт	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<b>Эпоха С</b>												
А										0,45		0,74
СПб						0,40	0,48				0,50	0,42
Р	-0,40											0,61
<b>Эпоха W</b>												
А					0,40				0,65		0,42	0,59
СПб										0,51		
Р												0,60
<b>Эпоха W+E</b>												
А										0,40	0,58	
СПб										0,40		
Р								0,44				
<b>Эпоха E+C</b>												
А						0,45						0,59
СПб						0,40	0,52					
Р	-0,40											0,64
<b>Эпоха E</b>												
А							0,40					0,40
СПб			0,51					0,42				
Р	-0,40				0,50							

Характерно, что для эпох С (самых холодных) наиболее существенны по влиянию на ледовые процессы Сибирский максимум и Исландский минимум, для эпох W+E (наиболее теплых) – Азорский максимум, для эпохи E+C – Сибирский и Азорский максимумы.

При смене эпохи степень зависимости сезонной суммы градусодней мороза (а, следовательно, и суровости зимы) от одного и того же предиктора может меняться не только по величине весового коэффициента, но и по знаку. Таких примеров в табл. 2-4 можно найти несколько. Например, в Белом море и Финском заливе для разности между давлением в районе Сибирского и Азорского максимумов в сентябре значения собственных коэффициентов корреляции в эпоху С отрицательные, а в эпоху E+C положительные.

Кроме того, следует отметить сходные процессы на соседних морях. Например, для Белого и Балтийского морей (табл. 2, 3) в эпоху С определяющим для будущей зимы является взаимодействие всех ЦДА в апреле. При этом коэффициенты корреляции между

комплексным показателем и суммой градусодней мороза (СГДМ) будущей зимы составляют 0,64-0,65. Обращает на себя внимание и связь СГДМ в этом месяце с давлением в районе Исландского минимума:  $K=(-0,55)-(-0,65)$ . В эпоху W+E существенна общая для двух морей связь СГДМ с разностью давления в районах Азорского максимума и Исландского минимума в сентябре:  $K = 0,40-0,51$ . Эта связь сохраняется и для Азовского моря при  $K=0,47$ .

Аналогии в процессах прослеживаются как для Белого и Балтийского морей, так и для Балтийского и Азовского моря (табл. 3, 4) в любую из пяти выявленных МЦЭ. Сопоставление степени связи между суровостью грядущей зимы на двух удаленных друг от друга морях с одними и теми же метеорологическими элементами свидетельствует о наличии аналогий в развитии ледовых процессов на этих морях.

Кроме принципа аналогичности прослеживается принцип преемственности процессов во времени. Так, в эпоху С наибольшие коэффициенты корреляции наблюдаются для связи СГДМ с давлением в районе Сибирского максимума в январе на Белом и Балтийском морях, а в феврале – на Балтийском и Азовском морях.

Изменение влияния термической составляющей имеет меридиональный характер. Так, будущую суровость зимы на Азовском море в значительной мере определяет температура воздуха в январе-мае, на Балтике – в июне-ноябре, на Белом море – в октябре-декабре.

Корреляционный анализ позволил выявить два периода, когда формирование барической ситуации, определяемой взаимодействием трех ЦДА, оказывает наибольшее влияние на суровость будущей зимы на акваториях трех морей. Это январь-апрель и август-октябрь.

Из рис. 1 следует, что наибольшее влияние барических тенденций на будущую зиму (январь-апрель и август-октябрь) приходится на периоды наиболее депрессивного состояния Азорского максимума, когда формируются тенденции, определяющие особенности обмена энергией между Сибирским максимумом и Исландским минимумом.

На рис. 2 и 3 можно видеть графики внутрисезонной изменчивости среднего месячного давления в районах ЦДА перед суровой зимой 1939-1940 гг. (эпоха С) и перед мягкой зимой 1999-2000 гг. (эпоха W+E).

Из рис. 2 следует, что для периода с января по март, предшествующего суровой для трех морей (Белого, Балтийского и Азовского) зиме 1939-1940 гг., характерно менее интенсивное падение давления в Сибирском антициклоне по сравнению со средними многолетними, а также слабый рост давления в районе Исландского минимума.

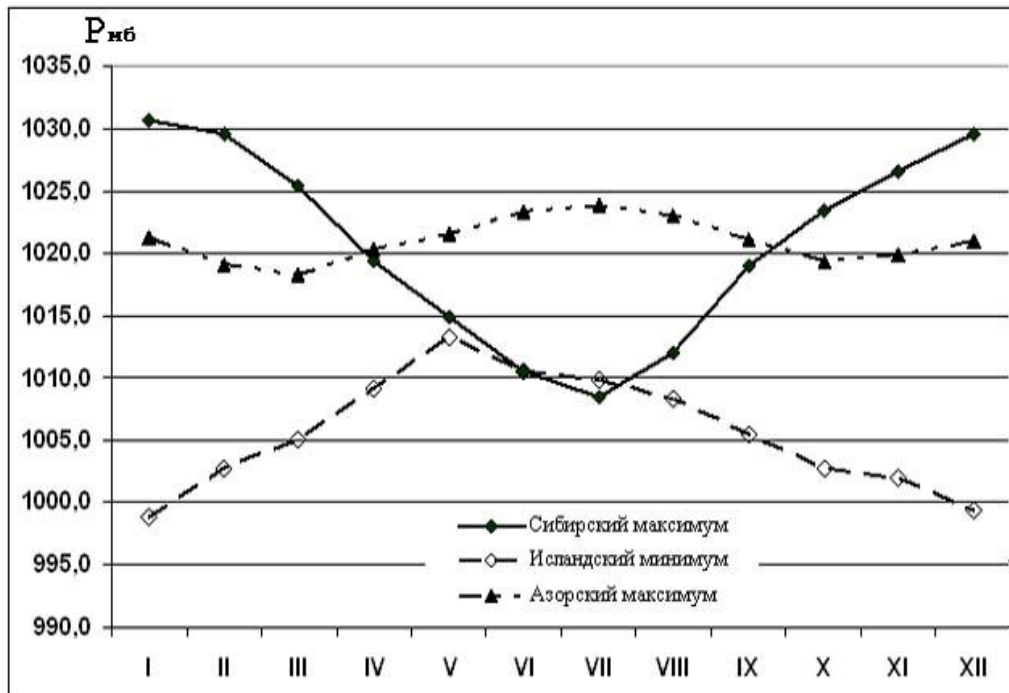


Рис. 1. Среднее месячное давление в районах ЦДА за период с 1895 по 2008 г.

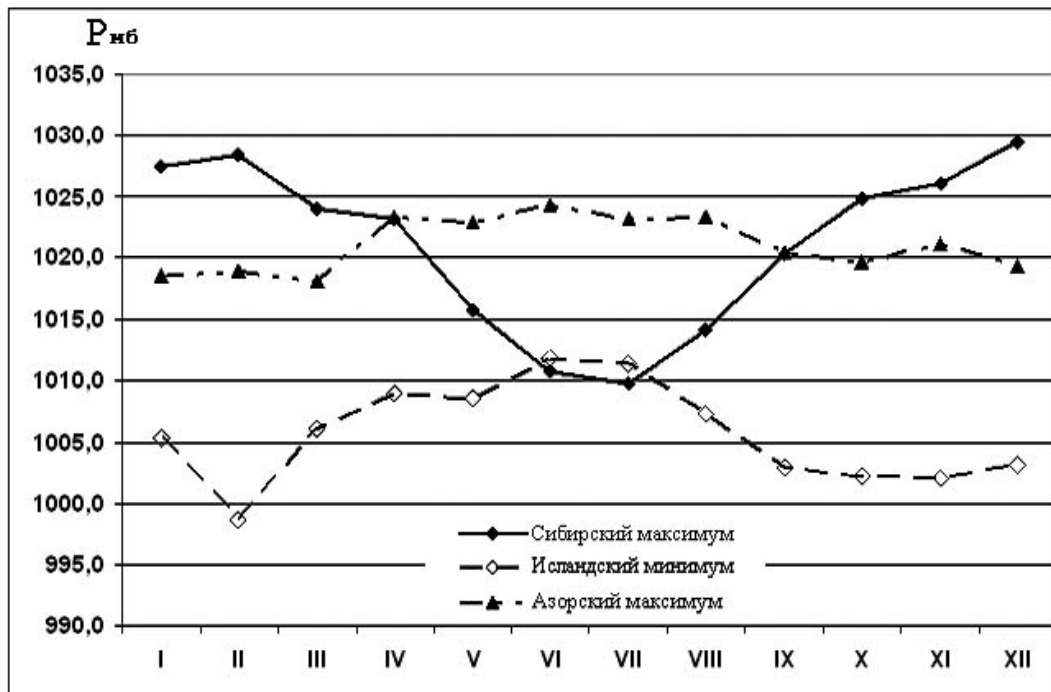


Рис. 2. Среднее месячное давление в районах ЦДА в 1939 г.

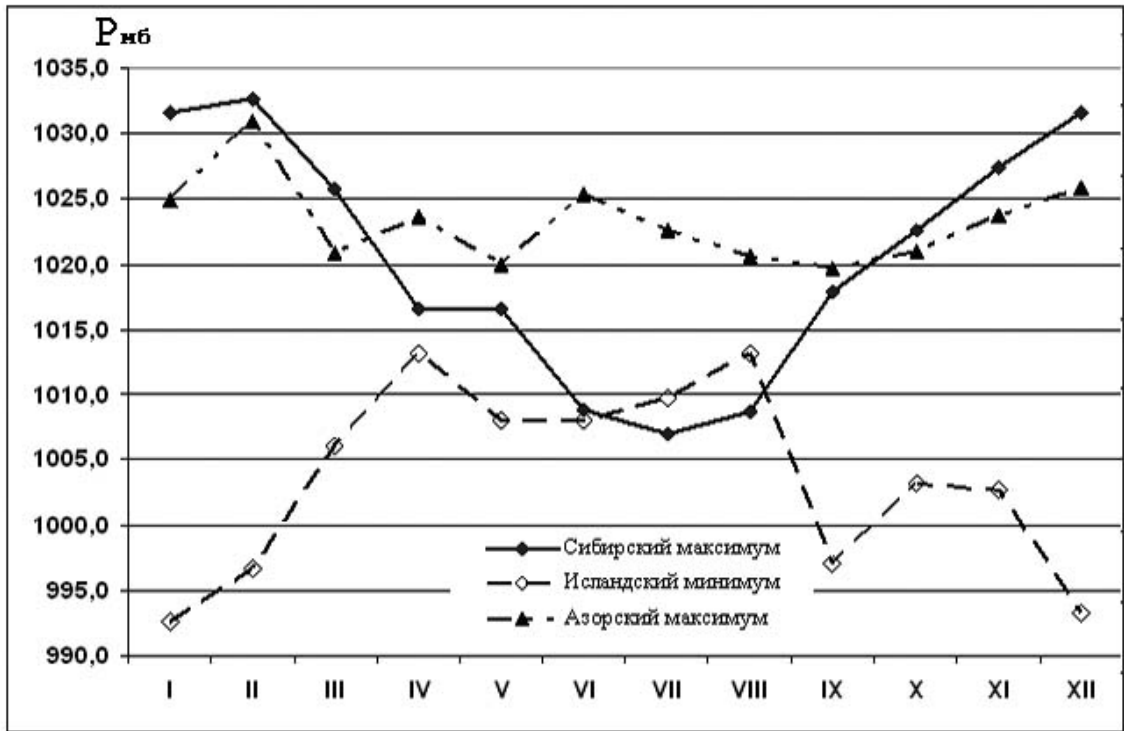


Рис. 3. Среднее месячное давление в районах ЦДА в 1999 г.

Обратная ситуация наблюдалась в 1999 г., предшествующем зиме 2000 г., которая была мягкой на всех трех морях. На рис. 3 явно прослеживается резкое падение давления в Сибирском антициклоне, крутой подъем кривой изменчивости давления в Исландском минимуме и активное состояние Азорского максимума. В августе-октябре ситуация зеркально повторяется, а именно: перед суровой зимой сравнительно медленно поднимается давление в Сибирском антициклоне и медленно опускается в Исландском минимуме на фоне спокойного состояния Азорского максимума, тогда как перед мягкой зимой активно повышается энергетика Азорского и Сибирского максимумов и резко идет вниз кривая давления в Исландском минимуме.

В лаборатории ледовых прогнозов Гидрометцентра России было также проверено, в какой степени связаны с началом и окончанием ледового периода такие часто используемые в прогностической практике предикторы, как переход температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  (осенью к отрицательным значениям и весной к положительным значениям). Кроме того, с целью возможного увеличения заблаговременности прогноза были определены коэффициенты корреляции для связи дат первого появления льда с датами перехода температуры воздуха через  $+5^{\circ}\text{C}$  осенью и дат окончательного очищения моря ото льда с датами перехода температуры воздуха через  $-5^{\circ}\text{C}$  весной. В табл. 6 приведены данные для трех морей с разбивкой по макроциркуляционным эпохам.

**Коэффициенты корреляции для связи дат наступления ледовых фаз с датами перехода температуры воздуха через +5 °С, через –5 °С, через 0 °С осенью и весной в Архангельске (А), Санкт-Петербурге (СПб) и Мариуполе (М)**

Эпоха	Порт	Первое появление льда		Устойчивое появление льда		Очищение моря ото льда	
		Dt <sub>5</sub>	Dt <sub>0</sub>	Dt <sub>5</sub>	Dt <sub>0</sub>	Dt <sub>-5</sub>	Dt <sub>0</sub>
С	А	0.88	0.40	0.81	0.46	0.55	0.89
	СПб	0.48	0.68	нд	нд	0.60	0.60
	М	0.80	0.97	нд	нд	0.64	0.68
W	А	0.47	0.92	0.45	0.85	0.28	0.81
	СПб	0.81	0.64	нд	нд	<0.1	0.85
	М	нд	нд	нд	нд	нд	нд
W+E	А	0.42	0.50	0.22	0.72	0.31	0.61
	СПб	0.47	0.47	нд	нд	0.40	0.44
	М	<0.1	0,70	нд	нд	0,40	0.87
E+C	А	0.38	0.56	0.58	0.96	0.30	0.76
	СПб	0.75	0.40	нд	нд	0.28	0.62
	М	0,46	0.42	нд	нд	0.22	0.38
Е	А	0.54	0.86	0.57	0.84	0.40	0.83
	СПб	<0.1	0.32	нд	нд	0.65	0.68
	М	0.18	0.84	нд	нд	0.59	0.71
Весь ряд	А	0.45	0.69	0.42	0.79	0.35	0.75
	СПб	0.44	0.40	нд	нд	0.53	0.64
	М	0.24	0.70	нд	нд	0.46	0.62

Примечание. Dt<sub>5</sub> – даты перехода температуры воздуха через +5 °С;,  
Dt<sub>0</sub> – даты перехода температуры воздуха через 0 °С осенью и весной;  
Dt<sub>-5</sub> – даты перехода температуры воздуха через –5 °С;  
нд – нет данных.

Для Белого моря, как показывает анализ табл. 6, высокие коэффициенты корреляции дат первого появления льда с датами перехода температуры воздуха через 0°С осенью ( $K=0,86-0,92$ ) наблюдаются только в эпоху W и в эпоху E. Таким образом, уравнения (1)-(3), полученные в Северном УГМС по рядам наблюдений для 60-80-х гг. XX века, как раз и отражают специфику эпохи E. Однако они должны работать значительно хуже в эпоху W+E 1991-2005гг., когда собственный коэффициент корреляции для основного предиктора (даты перехода температуры воздуха через 0 °С осенью), определяющего их эффективность, понизился до значения  $K= 0,50$ .

В табл. 7 приведены данные о средних многолетних значениях разностей между датами первого появления льда и датами устойчивого перехода температуры воздуха через  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta D_{\text{пт}+5}$ ) и через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta D_{\text{пт}+0}$ ) к отрицательным значениям осенью в Архангельске, Санкт-Петербурге и Мариуполе. Также приведены данные о средних значениях разностей между датами очищения моря ото льда и датами перехода температуры воздуха через  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta D_{\text{оо}-5}$ ) и через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta D_{\text{оо}-0}$ ) к положительным значениям весной.

Таблица 7

**Средние многолетние значения разностей между датами перехода температуры воздуха через фиксированные значения и наступлением ледовых фаз осенью и весной, сут**

Порт	$\Delta D_{\text{пт}+5}$	$\Delta D_{\text{пт}+0}$	$\Delta D_{\text{оо}-5}$	$\Delta D_{\text{оо}-0}$
Архангельск	30	7	47	22
Санкт-Петербург	30	2	53	31
Мариуполь	26	2	42	18

Из табл. 7 следует, что заблаговременность прогноза первого появления льда по датам перехода температуры воздуха осенью через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  к отрицательным значениям очень мала (особенно – для Балтийского и Азовского морей).

Как отмечалось выше, вторым предиктором в уравнениях (1)-(3) с высоким значением коэффициента корреляции, определяющим тесноту связи с датами ледообразования в Архангельске, была названа аномалия среднемесячной температуры воздуха в октябре. На рис. 4 приведен график скользящей величины коэффициента корреляции для 10-летних периодов наблюдений, характеризующий эту связь.

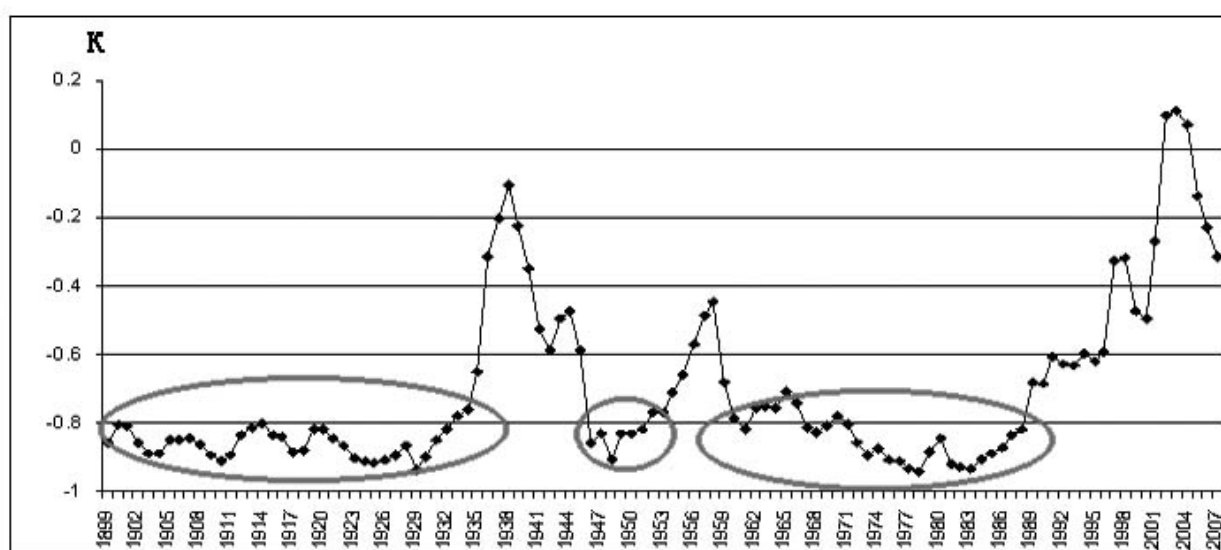


Рис. 4. Скользящая величина коэффициента корреляции (K), определяющего связь аномалии среднемесячной температуры воздуха в октябре с датами первого появления льда в Архангельске.



Можно видеть, что коэффициент корреляции имеет абсолютное значение более 0, 8 в следующие периоды: 90-е гг. XIX века -1930 г. – эпоха С и эпоха W; 1945-1950 гг. – эпоха С; 1968-1989 гг. – эпоха E.

График на рис. 4 в полной мере подтверждает тесноту связи, важную для корректных расчетов по уравнениям (1)-(3) для 60-80-х гг. XX века. Однако он столь же убедительно показывает, что эта связь не работает в эпохи W+E, как в первую (1929-1939 гг.), так и в последнюю (1991-2005 гг.), когда значения коэффициента корреляции стремятся к нулю.

Интересные результаты дает также исследование такой характеристики, как природная обеспеченность дат наступления ледовых фаз и продолжительности ледового периода для различных макроциркуляционных эпох (табл. 8).

Таблица 8

**Природная обеспеченность дат наступления ледовых фаз и продолжительности ледового периода для различных макроциркуляционных эпох (МЦЭ) в Архангельске (А), Санкт-Петербурге (СПб) и Мариуполе (М), %**

Эпоха	Порт	Первое появление льда	Устойчивое появление льда	Взлом припая	Полное очищение	Число дней со льдом	Среднее для всех характеристик
С	А	88	92	80	80	80	84
	СПб	79	нд	95	89	89	88
	М	67	нд	нд	83	83	78
W	А	73	77	69	73	69	72
	СПб	нд	нд	нд	нд	нд	нд
	М	нд	нд	нд	нд	нд	нд
W+E	А	70	74	74	67	82	73
	СПб	70	нд	67	82	74	73
	М	85	нд	нд	74	89	83
E+C	А	76	82	71	71	82	76
	СПб	76	нд	81	77	82	79
	М	71	нд	нд	88	77	79
E	А	64	76	76	80	64	72
	СПб	64	нд	нд	76	60	67
	М	76	нд	нд	68	68	71
Средняя обеспеченность за период наблюдений без разбивки на МЦЭ	А	69	64	72	73	67	69
	СПб	69	нд	76	74	72	73
	М	71	нд	нд	76	73	73
Средняя обеспеченность за период наблюдений с разбивкой по МЦЭ	А	74	80	74	74	75	75
	СПб	72	нд	80	80	74	77
	М	77	нд	нд	76	79	77

В сверхдолгосрочных прогнозах (свыше 6 мес) в качестве допустимой ошибки принимается значение среднего квадратического отклонения [1]. В связи с этим в качестве критерия природной обеспеченности принималось среднее квадратическое отклонение по расчетному ряду ( $\delta$ ). В табл. 9 приведены его значения для дат наступления ледовых фаз и продолжительности ледового периода в Архангельске, Санкт-Петербурге и Мариуполе.

Таблица 9

**Средние квадратические отклонения для дат наступления ледовых фаз  
и продолжительности ледового периода  
в Архангельске (А), Санкт-Петербурге (СПб) и Мариуполе (М), сут**

Порт	Первое появление льда	Устойчивое появление льда	Взлом припая	Полное очищение	Число дней со льдом
А	10	11	8	8	13
СПб	12	нд	15	11	18
М	18	нд	нд	17	29

Анализ табл. 9 показывает, что природная обеспеченность дат наступления ледовых фаз и продолжительности ледового периода имеет достаточно высокие значения, причем она повышается, когда расчет осуществляется по МЦЭ. При этом в качестве величины предсказываемой ледовой характеристики берется не среднее значение по всему имеющемуся ряду наблюдений, а среднее по МЦЭ. Такой подход может расцениваться как метод сверхдолгосрочного прогноза с оправдываемостью 70-80 %. Наиболее высокий процент обеспеченности (оправдываемости) для всех портов отмечается в эпохи С и Е+С.

Из вышесказанного следует, что с учетом изменчивости климатической ситуации в целях определения подхода к разработке методик долгосрочного прогноза необходимо следующее.

1. Проверить и переосмыслить все прошлые статистические выводы и связи.
2. Применить единый подход к поиску прогностических связей для всех российских морей.
3. Выявить квазиоднородные периоды, определяющие тот или иной тип развития ледовых условий.
4. Найти не только временные, но и пространственные связи между метеорологическими и ледовыми параметрами в разных морях.
5. Заложить в статистические модели возможности по осуществлению периодического корреляционного анализа предикторов, входящих в уравнения, и быстрой корректировки самих уравнений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абузяров З. К., Кудрявая К. И., Серяков Е. И., Скриптунова Л. И. Морские прогнозы. -Л.: Гидрометеиздат, 1988.- 320 с.
2. Вангенгейм Г. Я. Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики// Тр. ААНИИ.-1952.-Т. 34.-314 с.
3. 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.
4. Думанская И. О., Котилевская А. М., Федоренко А. Ф. Ледовые условия морей европейской части России в условиях климатических изменений (уроки зимы 2007-2008)// Метеоспектр.- 2008. -№ 2.- С. 134-144.
5. Руководство по морским гидрологическим прогнозам. - СПб.: Гидрометеиздат, 1994. - С. 350-432.
6. Скрипник Е. Н. Разработка методов прогнозов малой заблаговременности ледовых условий на судоходной трассе Архангельск - Святой Нос и на подходах к основным портам и портопунктам Белого моря в весенний и осенний периоды. Отчет по оперативно-методической теме// Архангельск. Северное УГМС, 1988.- 90 с.