

МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ НА БЕЛОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ

И.О. Думанская

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
sea-ice@mecom.ru

Введение

Необходимость разработки новых методов долгосрочного прогноза ледовых условий была вызвана тем, что проведенная оценка эффективности работы прогностических схем, разработанных в 80-х годах прошлого века, показала их недостаточную надежность [1, 7]. Разработанная технология прогноза ледовых характеристик на неарктических морях европейской части России включает прогноз элементов ледового режима, ежегодно публикуемых в бюллетене «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на предстоящий ледовый сезон», который готовится в ГУ «Гидрометцентр Россия» и рассылается заинтересованным потребителям в начале октября.

При этом прогнозируются следующие характеристики:

- даты первого появления льда в портах (ППЛ);
- максимальная за ледовый сезон ледовитость моря (МЛ);
- максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда в районе портов (МТЛ);
- даты окончательного очищения моря ото льда в районе портов (ООЛ);
- продолжительность ледового периода в районе портов (ПЛП).

Информационной основой методики прогноза являются материалы электронного архива метеорологической и ледовой информации, созданного в лаборатории ледовых прогнозов.

Технология долгосрочного прогноза представляет собой ансамблевый метод, включающий в себя три самостоятельных компоненты:

- а) расчет ледовых параметров по уравнениям множественной корреляции на основе использования характеристик поля температуры над евроатлантическим сектором;

б) расчет ледовых параметров по уравнениям множественной корреляции на основе использования характеристик поля давления над евроатлантическим сектором;

в) разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых характеристик на гармонические составляющие с последующей их экстраполяцией на предстоящий ледовый сезон.

В окончательном результате прогноза ледовых характеристик учитывается вклад всех трех компонент. При этом величина вклада в общий результат пропорциональна обеспеченности расчета по полным рядам наблюдений в рамках каждой компоненты [3]. Разработке методики прогноза предшествовала большая работа по изучению изменчивости характеристик ледового режима неарктических морей России, а также их связи с макроциркуляционными атмосферными процессами [4, 8].

1. Расчет и прогноз ледовых характеристик по уравнениям множественной корреляции на основе использования характеристик полей температуры и давления

В основу методики прогноза заложено предположение о том, что на будущую суровость зимы в любом пункте европейской части России (так же, как и на сопутствующие этой суровости ледовые характеристики, перечисленные выше) влияют:

- состояние и взаимодействие крупных термобарических атмосферных структур;
- наличие накладывающихся друг на друга циклов, определяемых внешним воздействием космических сил.

Для выявления степени влияния различных элементов термобарического поля на будущие ледовые процессы были определены коэффициенты корреляции для связи сумм градусодней мороза (СГДМ), а также ледовых характеристик в портах неарктических морей с предполагаемыми предикторами [5, 7]. Анализ осуществлялся для данных за 9 месяцев, предшествующих ледовому сезону (с января по сентябрь включительно). Ограничение набора предикторов сентябрьскими данными было определено тем, что результаты прогноза предоставляются потребителям ледовой информации в первых числах октября. По результатам корреляционного анализа были выбраны наиболее существенные предикторы, обладающие метеорологической памятью, наличие которой количественно подтверждается достаточно высокой корреляционной зависимостью. Отфильтрованные предикторы вошли в окончательные

уравнения [6, 7].

При этом анализировалась информация о приземном давлении для трех центров действия атмосферы и о температуре воздуха в Архангельске, Кандалакше, Санкт-Петербурге и Ростове-на-Дону по 110-летнему ряду наблюдений. Величины рядов составляют: для ледовитости – 55 лет, для толщины льда – 67–79 лет, для ледовых фаз и ледового периода – 82–110 лет.

Для морей европейской части России был выбран единый набор предикторов (42 характеристики поля температуры и 39 характеристик поля давления). Расчетные уравнения по всем портам имеют аналогичный вид, отличаясь только весовыми коэффициентами. Количество весовых коэффициентов, не равных нулю, в каждом уравнении не превышает 10–18 % ряда рассчитываемой (прогнозируемой) ледовой характеристики. Для оценки работы уравнений в качестве прогностических (по независимым рядам) использовались данные за 5 последних ледовых сезонов (с сезона 2005-2006 по сезон 2009-2010 гг.).

В качестве предикторов в уравнениях работают:

- среднемесячные значения давления в ЦДА и разности этих давлений на фиксированных направлениях;
- среднемесячные значения температуры воздуха, характеризующие причерноморскую (ПВМ), беломорскую (БВМ), евроатлантическую (ЕАВМ), сибирскую (СВМ) воздушные массы, и разности этих температур на фиксированных направлениях.

Если обозначить предикторы $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, то линейное уравнение множественной зависимости может быть записано так:

$$Y = A_i(B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + \dots + B_nX_n) + C_i, \quad (1)$$

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 (СГДМ, ППЛ, ПЛП, ООЛ, МЛ, МТЛ).

В табл. 1–4 в качестве примера приведены используемые в расчетных уравнениях весовые коэффициенты (B) и предикторы (X) для прогноза ППЛ и ООЛ в Кандалакше, и Архангельске и Мариуполе.

**Предикторы (X), характеризующие термический потенциал воздушных масс, и весовые коэффициенты (B) в уравнениях для прогноза ППЛ и ООЛ в Кандалакше (КАН),
Архангельске (АР), Мариуполе (МАР)**

Ледовые фазы Предикторы	ППЛ			ООЛ		
	КАН	АР	МАР	КАН	АР	МАР
<i>N года</i>	+0,050	+0,035	+0,070	-0,080	-0,015	-0,075
Причерноморская воздушная масса (ПВМ)						
<i>TP (I)</i>	0	0	0	0	0	+0,30
<i>TP (III)</i>	0	0	0	0	0	0
<i>TP (IV)</i>	0	-0,35	0	0	-0,18	0
<i>TP (V)</i>	+0,55	0	0	0	0	+0,45
<i>TP (VI)</i>	0	-0,25	+0,23	0	0	0
<i>TP (VII)</i>	0	0	0	0	+0,28	0
<i>TP (VIII)</i>	-0,23	+0,70	-0,14	-0,30	-0,40	-0,35
<i>TP (IX)</i>	0	+0,38	0	0	0	0
Беломорская воздушная масса (БВМ)						
<i>ТАр (I)</i>	0	+0,13	0	0	0	0
<i>ТАр (II)</i>	0	0	0	0	0	0
<i>ТАр (III)</i>	0	0	0	0	0	0
<i>ТАр (IV)</i>	0	0	0	-0,14	0	0
<i>ТАр (V)</i>	0	-0,25	0	0	0	0
<i>ТАр (VI)</i>	0	0	0	0	0	0
<i>ТАр (VII)</i>	+0,23	0	0	0	0	-0,19
<i>ТАр (VIII)</i>	0	0	+0,14	-0,09	-0,12	0
<i>ТАр (IX)</i>	0	+0,20	+0,42	0	0	0
Евроатлантическая воздушная масса (ЕАВМ)						
<i>ТСПб (II)</i>	+0,20	0	0	0	-0,08	0
<i>ТСПб (V)</i>	0	0	0	-0,18	+0,13	0
<i>ТСПб (VI)</i>	0	0	0	0	+0,38	-0,18
<i>ТСПб (VII)</i>	0	+0,42	-0,45	0	-0,10	0
<i>ТСПб (VIII)</i>	-0,70	-0,26	-0,18	+0,54	+0,70	+0,70
<i>ТСПб (IX)</i>	+0,34	+0,56	0	-0,70	-0,35	-0,38
Сибирская воздушная масса (СВМ)						
<i>ТИр (I)</i>	0	-0,13	0	0	0	0
<i>ТИр (II)</i>	-0,20	-0,25	0	0	-0,08	0
<i>ТИр (III)</i>	+0,47	+0,40	-0,23	-0,30	0	0
<i>ТИр (IV)</i>	0	0	0	+0,24	0	0
<i>ТИр (V)</i>	0	+0,35	-0,70	0	+0,22	+0,20
<i>ТИр (VII)</i>	0	0	-0,70	0	-0,16	0

Примечание: Здесь и в табл. 2: *TP* – температура воздуха в Ростове-на-Дону (пункт, характеризующий теплозапас причерноморской воздушной массы), *ТАр* – температура воздуха в Архангельске (пункт, характеризующий теплозапас беломорской воздушной массы), *ТСПб* – температура воздуха в Санкт-Петербурге (пункт, характеризующий теплозапас евроатлантической воздушной массы), *ТИр* – температура воздуха в Иркутске (пункт, характеризующий теплозапас сибирской воздушной массы); римской цифрой обозначен месяц.

**Предикторы (X), характеризующие интенсивность зонального и меридионального потоков тепла, и весовые коэффициенты (B) в уравнениях для прогноза ППЛ и ООЛ в
Кандалакше (КАН), Архангельске (АР), Мариуполе (МАР)**

Предикторы \ Ледовые фазы	ППЛ			ООЛ		
	КАН	АР	МАР	КАН	АР	МАР
Меридиональный температурный градиент						
$T_{Ар-ТСПб} (I)$	-0,24	+0,35	0	+0,15	0	+0,12
$T_{Ар-ТСПб} (II)$	-0,24	+0,20	0	+0,12	0	0
$T_{Ар-ТСПб} (III)$	0	0	0	0	0	-0,16
$T_{Ар-ТСПб} (IV)$	+0,35	0	0	0	+0,14	+0,15
$T_{Ар-ТСПб} (V)$	0	0	-0,55	0	0	0
$T_{Ар-ТСПб} (VIII)$	0	0	0	+0,20	0	0
Зональный температурный градиент						
$T_{Ир} - \frac{T_{Ар} + T_{СПб}}{2} (I)$	0	0	0	0	0	0
$T_{Ир} - \frac{T_{Ар} + T_{СПб}}{2} (III)$	-0,14	0	0	+0,20	+0,07	0
$T_{Ир} - \frac{T_{Ар} + T_{СПб}}{2} (VI)$	-0,14	-0,24	0	0	+0,35	0
$T_{Ир} - \frac{T_{Ар} + T_{СПб}}{2} (VII)$	0	0	0	0	0	0
$T_{Ир} - \frac{T_{Ар} + T_{СПб}}{2} (VIII)$	0	0	-0,48	0	+0,16	+0,25
$T_{Ир} - \frac{T_{Ар} + T_{СПб}}{2} (IX)$	0	0	-0,40	-0,46	-0,16	0

Из анализа табл. 1–4 следует, что на время первого появления льда в Архангельске наибольшее влияние оказывают:

а) характеристики температурного поля:

- 1) температура воздуха в районе Сибирского максимума в марте;
- 2) температура воздуха в районе Черного моря в августе;
- 3) температура воздуха в районе Балтики в июле и сентябре;

б) характеристики поля давления:

- 1) интенсивность зонального переноса в марте и апреле;
- 2) давление в районе Сибирского максимума в январе, марте и мае.

На время первого появления льда в Мариуполе наибольшее влияние оказывают:

а) характеристики температурного поля:

- 1) температура воздуха в районе Сибирского максимума в мае и июле;
- 2) меридиональный температурный градиент в мае;
- 3) температура воздуха в районе Балтики в июле;

б) характеристики поля давления:

- 1) давление в районе Сибирского максимума в марте и сентябре.

**Предикторы (X), характеризующие влияние интенсивности зонального
и меридионального потоков воздуха, и весовые коэффициенты (В) в уравнениях
для прогноза ШЛ и ООЛ в Кандалакше (КАН), Архангельске (АР), Мариуполе (МАР)**

Ледовые фазы Предикторы	ШЛ			ООЛ		
	КАН	АР	МАР	КАН	АР	МАР
<i>N года</i>	+0,050	+0,035	+0,070	-0,080	-0,015	-0,075
Зональный перенос (ЗП)						
$P_c - \frac{P_a + P_u}{2}$ (I)	0	0	+0,24	0	+0,30	+0,50
$P_c - \frac{P_a + P_u}{2}$ (II)	0	-0,14	0	0	+0,14	0
$P_c - \frac{P_a + P_u}{2}$ (III)	0	+0,70	+0,24	0	0	-0,28
$P_c - \frac{P_a + P_u}{2}$ (IV)	-0,55	-0,45	0	+0,35	0	0
$P_c - \frac{P_a + P_u}{2}$ (V)	-0,55	0	0	0	0	0
$P_c - \frac{P_a + P_u}{2}$ (VI)	0	0	+0,30	0	0	0
$P_c - \frac{P_a + P_u}{2}$ (VIII)	0	0	0	-0,70	-0,70	-0,70
$P_c - \frac{P_a + P_u}{2}$ (IX)	+0,40	+0,28	0	-0,70	-0,44	0
Атлантический меридиональный перенос (МП)						
$P_a - P_u$ (I)	0	0	0	0	0	0
$P_a - P_u$ (V)	0	0	0	-0,28	-0,18	0
$P_a - P_u$ (VII)	0	0	0	0	0	0
$P_a - P_u$ (IX)	+0,25	+0,16	0	0	+0,45	0

Примечание: Здесь и в табл. 4: P_c – давление в Сибирском максимуме (Иркутск), P_u – давление в Исландском минимуме (Рейкьявик), P_a – давление в Азорском максимуме (Понта Делгада); римской цифрой обозначен месяц.

**Предикторы (X), характеризующие влияние центров действия атмосферы, и весовые коэффициенты (B) в уравнениях для прогноза ШЛ и ООЛ в Кандалакше (КАН),
Архангельске (АР), Мариуполе (МАР)**

Ледовые фазы Предикторы	ШЛ			ООЛ		
	КАН	АР	МАР	КАН	АР	МАР
Исландский минимум (ИМ)						
<i>Pu (I)</i>	0	0	0	0	+0,15	0
<i>Pu (II)</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Pu (III)</i>	0	+0,10	+0,13	+0,10	+0,18	-0,14
<i>Pu (IV)</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Pu (V)</i>	0	0	0	-0,18	-0,24	+0,25
<i>Pu (VI)</i>	0	0	0	+0,18	-0,15	+0,18
<i>Pu (VII)</i>	+0,50	-0,18	+0,37	+0,15	+0,20	0
<i>Pu (VIII)</i>	0	-0,30	+0,14	0	0	0
<i>Pu (IX)</i>	0	0	-0,16	0	+0,35	0
Сибирский максимум (СМ)						
<i>Pc (I)</i>	0	+0,40	-0,30	0	-0,25	-0,70
<i>Pc (II)</i>	0	0	-0,22	0	0	0
<i>Pc (III)</i>	-0,30	-0,45	+0,44	0	0	-0,30
<i>Pc (IV)</i>	+0,45	0	0	0	-0,19	0
<i>Pc (V)</i>	+0,70	+0,50	0	0	+0,22	0
<i>Pc (VI)</i>	+0,70	0	0	0	0	0
<i>Pc (VII)</i>	0	0	0	0	0	-0,18
<i>Pc (VIII)</i>	+0,55	-0,35	0	+0,28	+0,50	-0,30
<i>Pc (IX)</i>	-0,55	-0,28	+0,70	+0,70	+0,70	+0,70
Азорский максимум (АМ)						
<i>Pa(I)</i>	+0,25	0	0	0	0	0
<i>Pa(II)</i>	0	0	-0,24	-0,22	0	0
<i>Pa(III)</i>	0	-0,10	0	-0,16	0	-0,32
<i>Pa(IV)</i>	0	0	0	-0,22	-0,32	-0,55
<i>Pa(VI)</i>	+0,60	0	0	0	0	0
<i>Pa(VII)</i>	0	-0,35	0	0	-0,26	0
<i>Pa(VIII)</i>	0	0	-0,14	0	0	0
<i>Pa(IX)</i>	0	0	0	0	0	0

На изменчивость дат окончательного очищения моря ото льда в районе Архангельска наибольшее влияние оказывают:

а) характеристики температурного поля:

- 1) температура воздуха в районе Балтики в августе;
 - 2) температура воздуха в районе Черного моря в августе;
- б) следующие характеристики поля давления:
- 1) интенсивность зонального переноса в августе и сентябре;
 - 2) интенсивность меридионального переноса в сентябре;
 - 3) давление в районе Сибирского максимума в августе и сентябре.

На изменчивость дат окончательного очищения моря ото льда в районе Мариуполя наибольшее влияние оказывают:

- а) характеристики температурного поля:
- 1) температура воздуха в районе Балтики в августе;
 - 2) температура воздуха в районе Черного моря в мае;
- б) характеристики поля давления:
- 1) интенсивность зонального переноса в январе и августе;
 - 2) давление в районе Сибирского максимума в январе и сентябре;
 - 3) давление в районе Азорского максимума в апреле.

Таблицы, аналогичные табл. 1–4, составлены также для сумм градусодней мороза, ледовитости моря, максимальной за зиму толщины льда в портах Белого и Азовского морей. Ряд полученных уравнений в совокупности являются статистической моделью эволюции ледяного покрова неарктических морей. Поскольку во всех уравнениях весовые коэффициенты нормированы единообразно, а именно, от 0 до 0,7 по абсолютной величине, то пространственное распределение их значений при более широкой географии пунктов, для которых осуществляется расчет, может дать 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 ледовой ситуации на морях во времени и пространстве.

2. Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых характеристик на гармонические составляющие с последующей экстраполяцией на предстоящий ледовый сезон

В соответствии с основной гипотезой методики долгосрочного ледового прогноза циклические процессы являются основополагающими в климатической изменчивости для любого района Земного шара. Специалисты Института Арктики и Антарктики в разные годы занимались анализом межгодовых изменений характеристик ледяного

покрова арктических морей и пришли к выводу о том, что частотная структура изменений площади ледяного покрова морей Северного Ледовитого океана характеризуется более или менее заметными пиками. Эти пики наблюдаются на периодах 2–3 года, 5–7, 8–12, 20 и 50–60 лет [10].

Из соображения рациональности устройства вселенной, которое единственным образом может оправдать как наличие цикличности, так и саму возможность долгосрочного прогнозирования, в рамках разработки методики долгосрочного ледового прогноза было сделано предположение, что имеется некоторый глобальный период, в который вкладываются все гармоники, описывающие изменчивость ледовых процессов на европейских морях. Иными словами, на абсциссе времени существуют узловые годы, когда ординаты всех гармоник обращаются в ноль.

Периоды циклов для гармоник определялись по ряду температуры воздуха в Санкт-Петербурге, для которого имеется наибольшее количество наблюдений. Разложению подвергался 200-летний ряд отклонений СГДМ от генерального тренда (Δ СГДМ). При этом генеральный тренд также описывался длиннопериодной гармоникой, наиболее близко соответствующей полиномиальному тренду 2-го порядка. Кроме температурного ряда для Санкт-Петербурга, было сделано разложение четыре длинных рядов СГДМ: для Архангельска – 192 года, Москвы – 130 лет, Ростова-на-Дону – 124 года, Астрахани – 115 лет и трех более коротких – Нирьян-Мара – 83 года, Диксона – 89 лет – Челюскина – 77 лет.

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:

$$G = A(\sin((N_i - N_0)2\pi/\Delta t)) + C, \quad (2)$$

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

При этом 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 $\Delta T = 5044$.

Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых параметров на гармонические составляющие осуществлено для рядов СГДМ, значений ледовитости моря и ледовых фаз для Архангельска, Кандалакши и Мариуполя по 31 гармонике.

В табл. 5 приведены параметры для 31 гармоник, сумма которых аппроксимирует СГДМ в Санкт-Петербурге и Архангельске, а также коэффициенты корреляции для гармоник (K). На рис. 1 приведена фактическая и вычисленная как сумма гармоник СГДМ в Санкт-Петербурге.

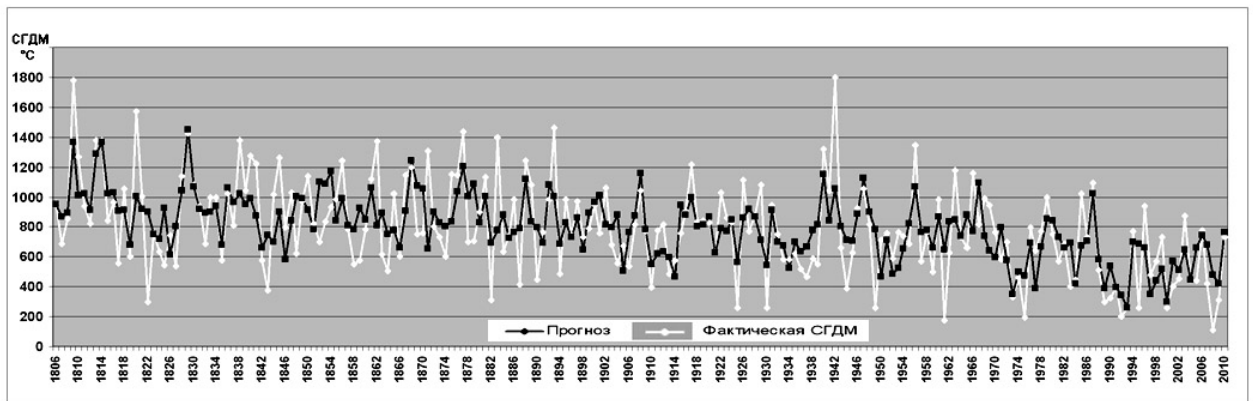


Рис. 1. Фактическая и вычисленная как сумма гармоник СГДМ в Санкт-Петербурге.

В третьей компоненте методики долгосрочного прогноза суммы гармоник, параметры которых приведены в табл. 5, аппроксимируют ряды изменчивости ледовых параметров с последующей экстраполяцией на предстоящий ледовый сезон.

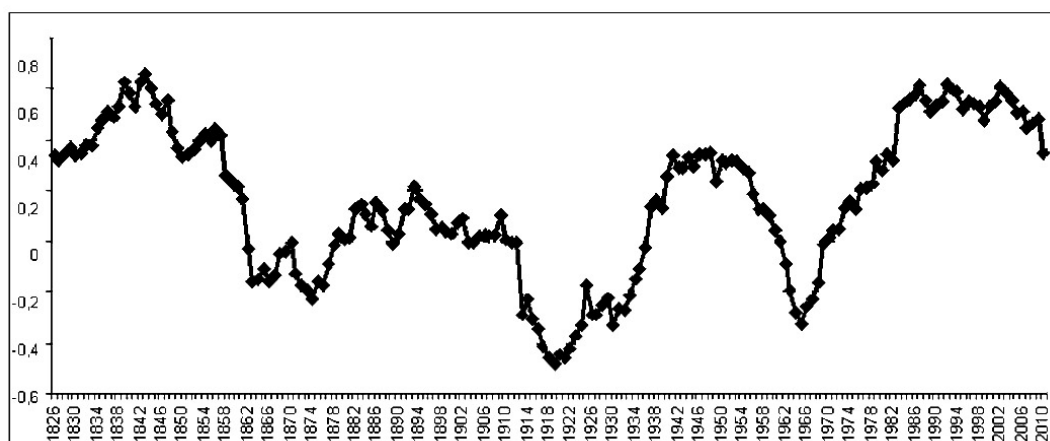
**Параметры гармоник, полученные по 200-летнему ряду СГДМ в Санкт-Петербурге (СПб)
и по 192-летнему ряду СГДМ в Архангельске (АР)**

№ гармоники	m	Δt	К (СПб)	К (АР)
1 (генеральный тренд)	5	1008,80	0,40	0,23
2	37	136,32	0,07	0,22
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
Суммарный коэффициент корреляции			0,80	0,74

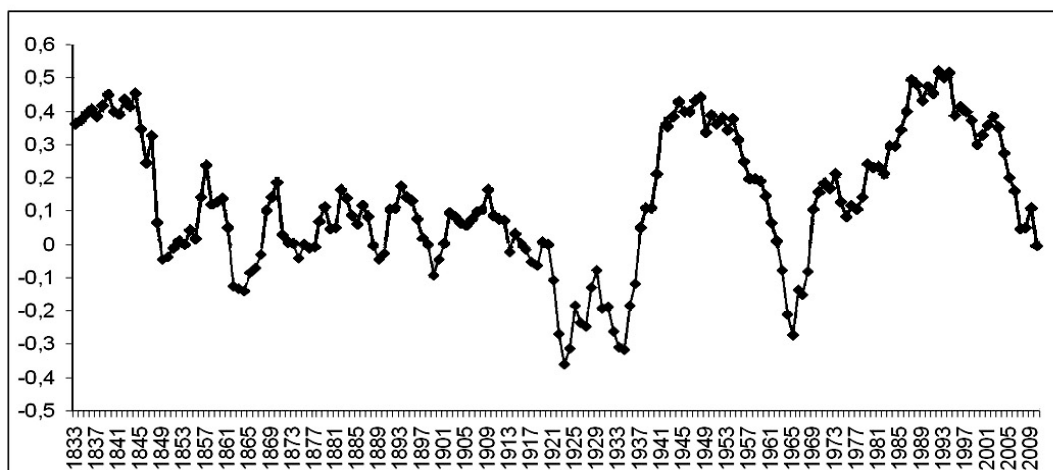
Несмотря на то, что суммарные коэффициенты корреляции достаточно высоки (0,7-0,8), а использованные ряды имеют большую длину, существует необходимость удостовериться в том, что влияние той или иной гармоники на изменчивость СГДМ не является случайным. Поскольку коэффициенты корреляции для любой гармоники непрерывно изменяются с течением лет, можно предположить, что для каждой из них в рамках 200-летнего периода изменчивости СГДМ существуют более короткие периоды с высокими коэффициентами корреляции. Возьмем для анализа 20-летние периоды,

исходя из сделанного ранее вывода о том, что климатическая устойчивость в рамках одной макроциркуляционной эпохи возможна на протяжении периода, близкого к 20 годам [8].

На рис. 2 приведен график изменчивости скользящего по 20-летиям коэффициента корреляции между значениями гармоники №11 ($m=544$, $\Delta t=9,27$) и отклонением фактической СГДМ в Санкт-Петербурге и Архангельске от генерального тренда.



а)

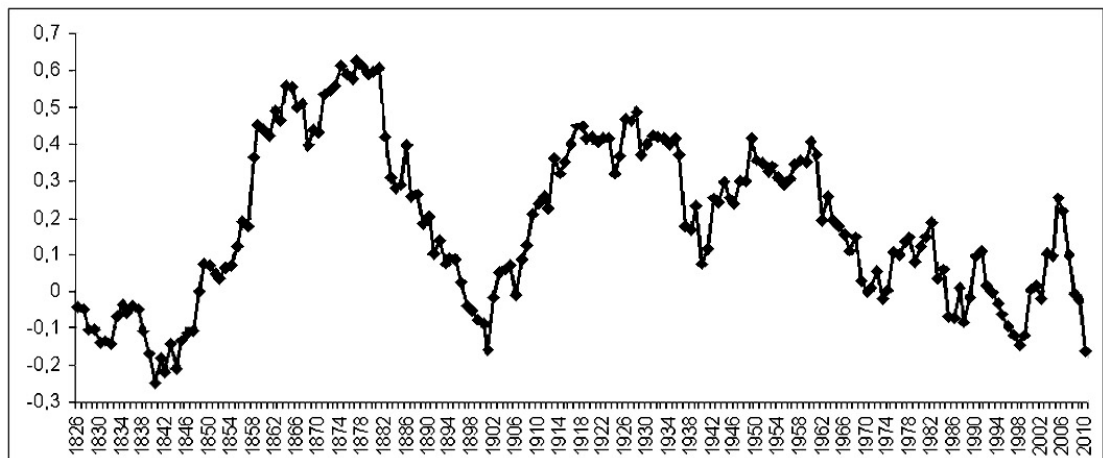


б)

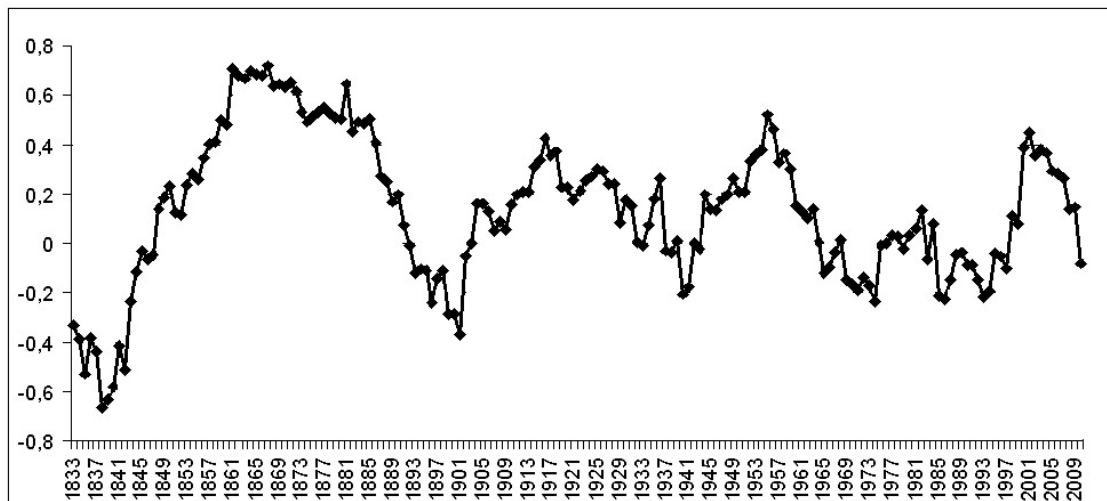
Рис. 2. Изменчивость скользящего по 20-летиям коэффициента корреляции между значениями гармоники №11 ($m=544$, $\Delta t=9,27$) и отклонением фактической СГДМ от генерального тренда в Санкт-Петербурге (а) и Архангельске (б).

На рис. 3 приведен график изменчивости скользящего по 20-летиям коэффициента корреляции между значениями гармоники №17 ($m=998$, $\Delta t=5,05$) и

отклонением фактической СГДМ в Санкт-Петербурге и Архангельске от генерального тренда.



а)



б)

Рис. 3. Изменчивость скользящего по 20-летиям коэффициента корреляции между значениями гармоники №17 ($m=998$, $\Delta t=5,05$) и отклонением фактической СГДМ от генерального тренда в Санкт-Петербурге (а) и Архангельске (б).

Полагаясь на закон Стьюдента, можно утверждать, что для объема выборки 20 лет и для уровней значимости 5 % и 1 % параметр Стьюдента должен быть равным не менее 2,101 и 2,878 соответственно. Коэффициенты корреляции при таких условиях должны составлять 0,45 и 0,56 [9]. Из анализа графиков на рис. 2 и 3 следует, что для рассматриваемых гармоник максимальные коэффициенты корреляции по 20-летнему ряду 0,50–0,75, а это значит, что с вероятностью 95–99% можно утверждать, что данная

связь не случайна. Подобный анализ был проведен для всех гармоник. Максимальные (скользящие по 20-летиям) коэффициенты корреляции составили от 0,42 до 0,80.

Графики на рис. 2 и 3 показывает, что в поведении аналогичных гармоник, аппроксимирующих параметр ледового режима в различных географических пунктах (в данном случае – сумму градусодней мороза в Санкт-Петербурге и в Архангельске) присутствуют как сходные черты, так и существенные различия.

Разделение ряда наблюдений с 1900 года по 2010 г. на макроциркуляционные эпохи осуществляется следующим образом: до 1902 г. – эпоха С, с 1903 по 1928 г. – эпоха W, с 1929. по 1939 г. – эпоха W+E, с 1940. по 1948 г. – эпоха С, с 1949. по 1965 г. - эпоха E+C, с 1966. по 1990 г. – эпоха E, с 1991. по 2010 г. – эпоха W+E [8].

На рис. 2 ясно прослеживаются моменты смены макроциркуляционных эпох на границе 1928-29 гг., когда эпоха W поменялась на эпоху W+E, и на границе 1965-1966 гг., когда эпоха E+C поменялась на эпоху E.

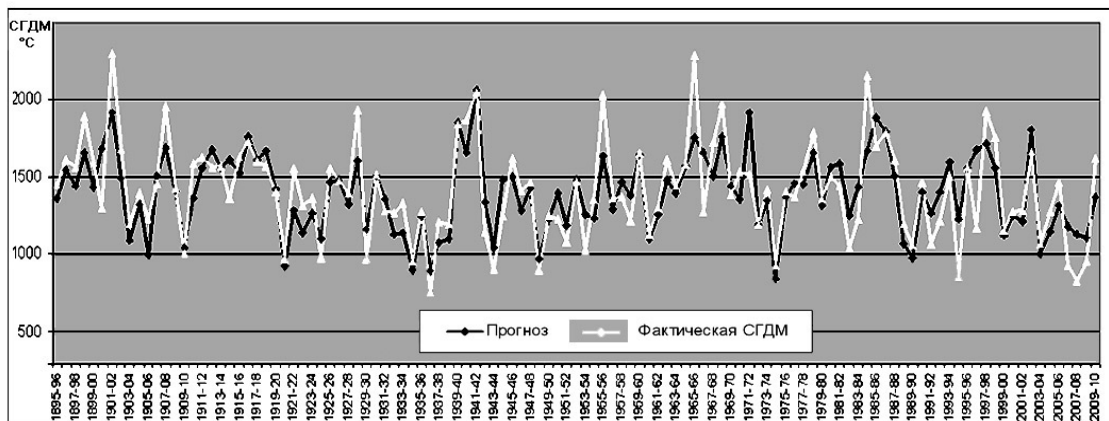
На рис. 3 хорошо видны смены макроциркуляционных эпох на границе 1902-1903 гг., когда эпоха С поменялась на эпоху W, и на границе 1939-40 гг., когда эпоха W+E поменялась на эпоху С.

Эти факты свидетельствуют о том, что смена макроциркуляционных эпох, по всей вероятности, является результатом проявления суммарного действия циклических процессов.

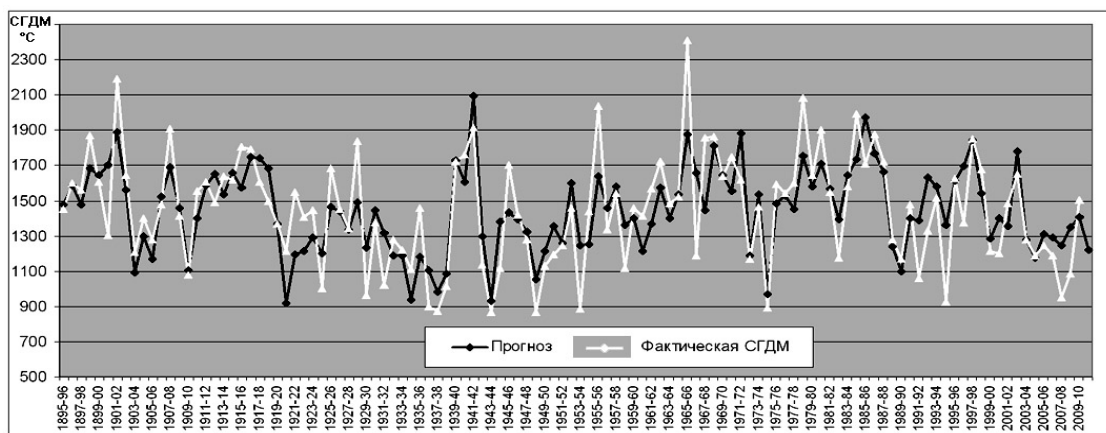
Коэффициенты корреляции между рядами значений, рассчитанных по гармоникам, и соответствующими рядами фактических величин для различных ледовых характеристик и портов варьируют от 0,55 до 0,80. В частности, коэффициент корреляции между расчетными и фактическими значениями СГДМ для Архангельска за 192 года составил 0,76, обеспеченность – 84 %. Эффективность по зависимому ряду в сравнении с климатической обеспеченностью – 18 %.

3. Результаты работы ансамблевого метода для Белого и Азовского морей

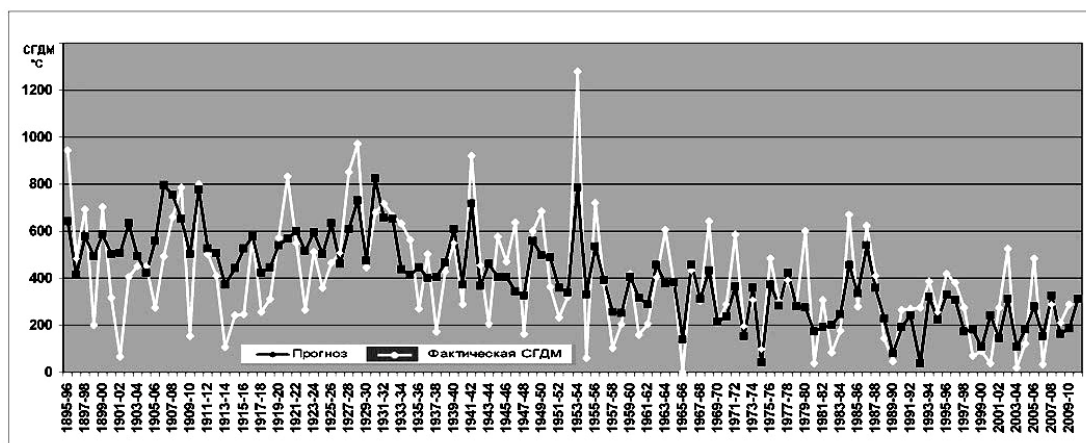
Ниже приведены результаты работы ансамблевого метода для Белого и Азовского морей. На рис. 4 – данные расчета СГДМ в Архангельске, Кандалакше и Ростове-на-Дону.



а)



б)



в)

Рис. 4. Расчет СГДМ в Архангельске (а), Кандалякше (б) и Ростове-на-Дону (в) по зависимому (1896-2005 гг.) и независимому (2006-2010 гг.) рядам.

Коэффициенты корреляции между рядами рассчитанных значений и соответствующими рядами фактических величин для зависимого ряда составили по Архангельску и Кандалякше, соответственно, 0,82 и 0,78, обеспеченность метода – 91 и

88 %, эффективность метода – 20 и 19 %. Эффективность по 5-летнему независимому ряду составила 60 и 40 % соответственно.

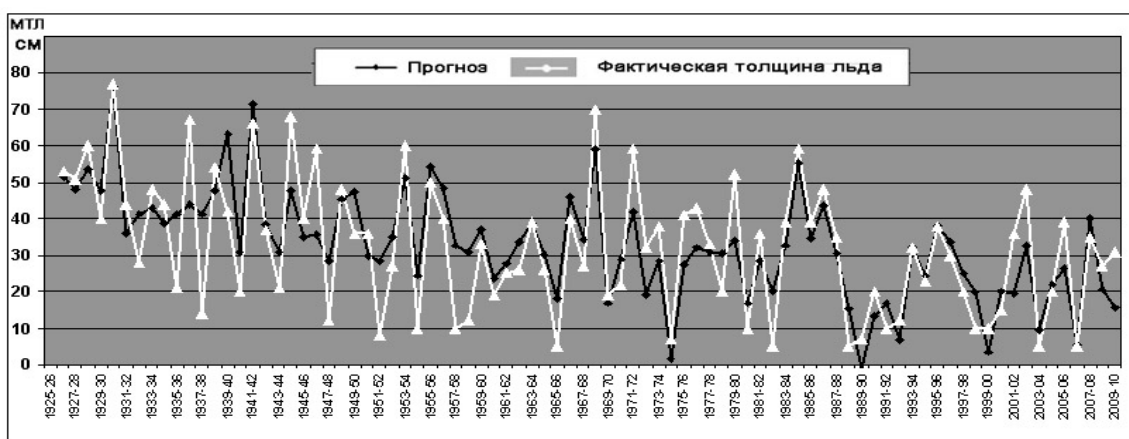
Для Ростова-на-Дону коэффициент корреляции равен 0,72, обеспеченность метода – 84 %, эффективность метода – 18 %. Эффективность по 5-летнему независимому ряду составила 20 %.

Высокая эффективность прогноза за период последних пяти лет для Белого моря объясняется климатически нетипичным ходом ледовых процессов здесь в это время. Мерой оправдываемости в прогнозах СГДМ и других характеристик предстоящего ледового сезона служит среднее квадратическое отклонение (δ).

На рис. 5 приведены результаты расчета по зависимому ряду и прогноза по независимому ряду наибольшей за зиму толщины припайного льда для острова Мудьюг (Белое море) и Мариуполя (Азовское море).



а)



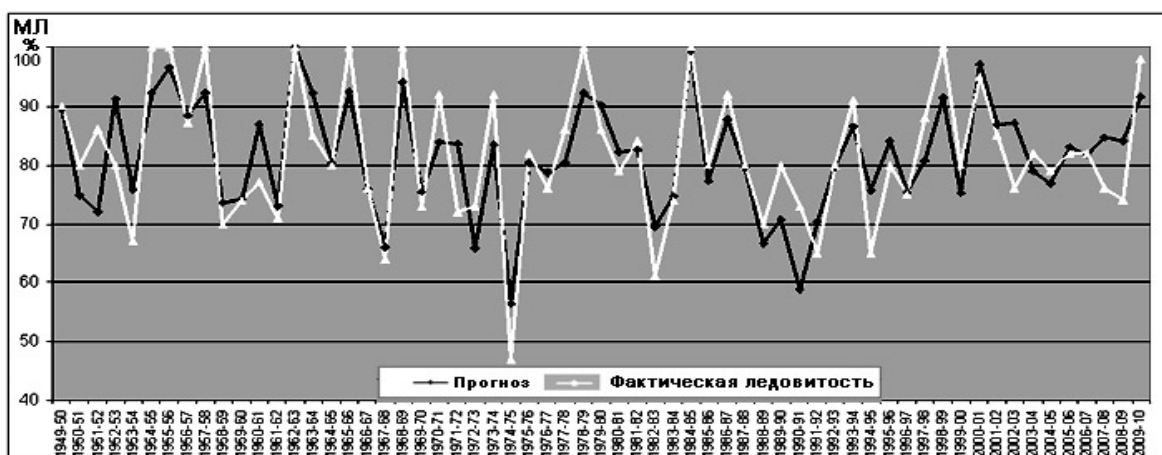
б)

Рис. 5. Расчет максимальной за зиму толщины льда в районе острова Мудьюг (а) и Мариуполя (б).

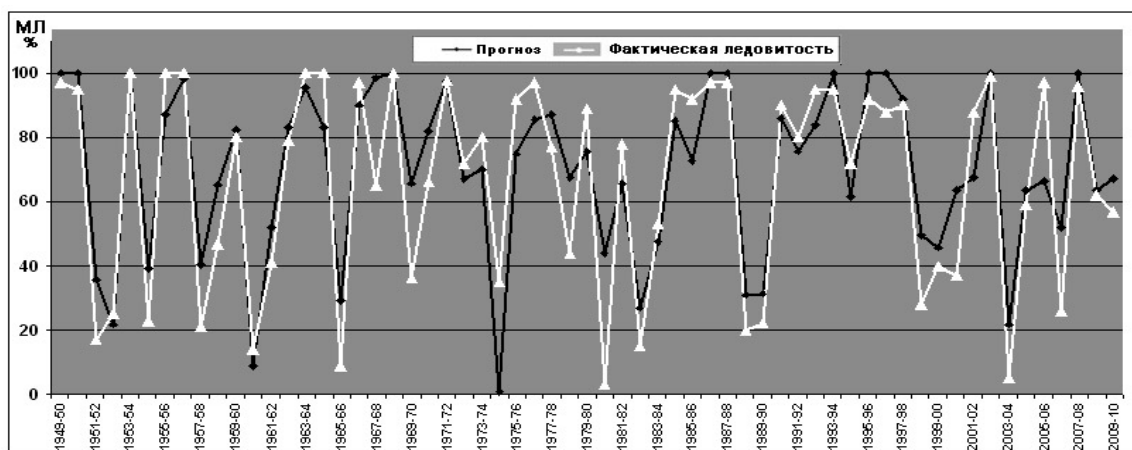
Для района Мудьюга коэффициент корреляции между рядами рассчитанных значений МТЛ и соответствующими рядами фактических величин для зависимого ряда составляет 0,71, обеспеченность метода – 89 %, эффективность метода – 16 %. Оправдываемость по 5-летнему независимому ряду составила, как по климатическому, так и по методическому прогнозу 100 %.

Для Мариуполя коэффициент корреляции равен 0,80, обеспеченность метода – 88 %, эффективность метода – 26 %. Эффективность по 5-летнему независимому ряду составила 20 %.

На рис. 6 приведены данные расчета ледовитости Белого (северная часть) и Азовского морей.



а)



б)

Рис. 6. Расчет максимальной за ледовый сезон ледовитости Белого (а) и Азовского (б) морей.

Для Белого моря коэффициент корреляции между рядами рассчитанных значений и соответствующими рядами фактических величин для зависимого ряда составляет

0,83, обеспеченность метода – 96 %, эффективность метод – 25 %. Эффективность по 5-летнему независимому ряду составила 20 %.

Для Азовского моря коэффициент корреляции составляет 0,88, обеспеченность метода – 95 %, эффективность метода – 27 %. Эффективность по 5-летнему независимому ряду составила 20%.

На рис. 7-8 приведены результаты прогноза дат первого появления и окончательного очищения акватории порта ото льда в Архангельске.

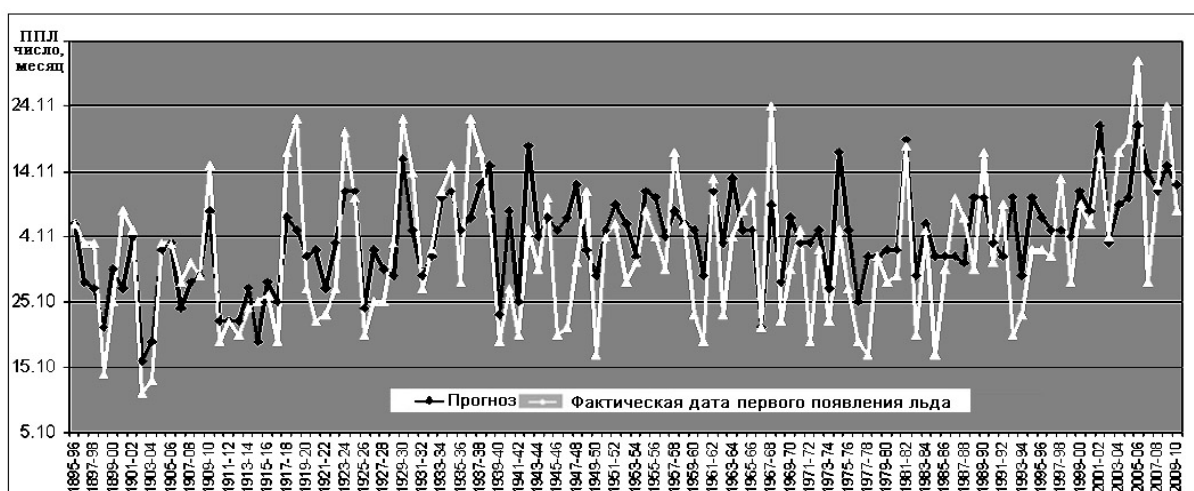


Рис. 7. Расчет дат первого появления льда в Архангельске.

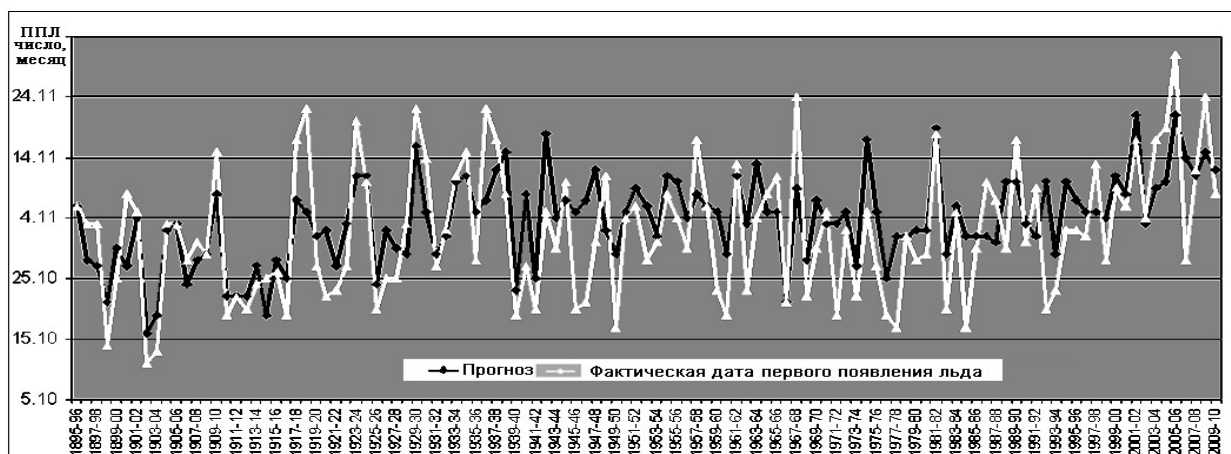


Рис. 8. Расчет дат окончательного очищения моря ото льда в Архангельске.

Коэффициент корреляции между рядами рассчитанных значений ППЛ и соответствующими рядами фактических величин по зависимому ряду составляет для Архангельска 0,69, обеспеченность метода – 83 %, эффективность – 17 %. Эффективность по 5-летнему независимому ряду составила 40 %.

Для Кандалакши коэффициент корреляции по зависимому ряду составляет 0,77, обеспеченность метода – 89 %, эффективность – 24 %. Эффективность по 5-летнему независимому ряду составила 40 %.

Для Мариуполя коэффициент корреляции по зависимому ряду составляет 0,78, обеспеченность метода – 92 %, эффективность – 20 %. Эффективность по 5-летнему независимому ряду составила 20 %.

Коэффициент корреляции между рядами рассчитанных значений ООЛ и соответствующими рядами фактических величин для зависимого ряда составляет для Архангельска 0,67, обеспеченность метода – 87 %, эффективность – 13 %. Оправдываемость прогноза по 5-летнему независимому ряду составила, как по климатическому, так и по методическому прогнозу, 100 %.

В районе Кандалакши для ООЛ коэффициент корреляции по зависимому ряду составляет 0,85, обеспеченность метода – 93 %, эффективность – 31 %. Эффективность по 5-летнему независимому ряду составила 60 %.

Для Мариуполя коэффициент корреляции по зависимому ряду составляет 0,80, обеспеченность метода – 95 %, эффективность – 23 %. Эффективность по 5-летнему независимому ряду составила 20 %.

Выводы

1. Результаты расчета ледовых характеристик Белого и Азовского морей ансамблевым методом по зависимому и независимому рядам дали хороший результат. Средняя для всех пунктов эффективность метода по зависимым рядам (представляющим полные ряды наблюдений) составляет для элементов ледового режима:

- СГДМ – 19 % при обеспеченности 88 %;
- ППЛ – 20 % при обеспеченности 88 %;
- ООЛ – 22 % при обеспеченности 91 %;
- ЛП – 18 % при обеспеченности 88 %;
- МЛ – 26 % при обеспеченности 95 %;
- МТЛ – 21 % при обеспеченности 88 %.

2. Проведены испытания работы метода по независимому 5-летнему ряду данных. Эффективность метода по независимым рядам составляет в среднем для элементов ледового режима: СГДМ – 30 %; ППЛ – 26 %; ООЛ – 26 %; ЛП – 40 %; МЛ – 20 %;

МТЛ – 20 % , что не ниже данных, полученных по зависимому ряду. Это свидетельствует об устойчивости работы уравнений.

4. По данным гармонического анализа, в ближайшее 10-летие на акватории Белого моря наиболее тяжелая ледовая обстановка возможна в ледовый сезон 2014-2015 гг., на Азовском море – в 2018-2019 гг. Процесс потепления в евроатлантическом регионе будет продолжаться еще в течение длительного периода, порядка 260 лет. Кроме того, если признать правдоподобие гармонической компоненты данной статистической модели, то придется весьма критично отнестись к многочисленным аналоговым методам долгосрочных прогнозов, поскольку из проведенного исследования следует, что повтор аналогичной климатической ситуации возможен раз в 5000 лет.

В дальнейшем, с увеличением рядов наблюдений, предполагается осуществлять совершенствование метода долгосрочного прогноза ледовых явлений: включать в уравнения новые значимые предикторы, проводить фильтрацию используемых предикторов. В силу того, что факторы влияния на ледовые процессы детерминированы по трем признакам, есть возможность отслеживать степень вклада каждой компоненты в общий результат и осуществлять совершенствование метода в рамках каждой компоненты.

Список использованных источников

1. *Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С.* Оперативное океанографическое обслуживание. – М., 2009. – 287 с.
2. *Абузяров З.К., Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И.* Морские прогнозы. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 320 с.
3. *Думанская И.О.* Методика долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеоспектр. – 2009. – № 4. – С. 88–96.
4. *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. – № 77. – С. 28–142.
5. *Думанская И.О.* Проблемы разработки методик долгосрочных ледовых прогнозов в условиях современных изменений климата // Метеоспектр. – 2008. – № 4. – С. 25–30.
6. *Думанская И.О., Котилевская А.М.* Методика долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Баренцевом морях // Метеоспектр. – 2010. – № 2. – С. 14–22.

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., Федоренко А.В.* Анализ связи ледовых характеристик морей европейской части России с макроциркуляционными атмосферными процессами // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 12. – С. 82–94.

9. *Ефимова М.Р.* Статистика. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 335 с.

10. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Научные исследования в Арктике. Том 2. Климатические изменения ледяного покрова морей евроазиатского шельфа. – СПб.: Наука, 2007. – 135 с.

Поступила в редакцию 15.04.2011