

ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЛЕДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРЕЙ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ НА РУБЕЖЕ XX–XXI вв.

И.О. Думанская

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

Введение

Приведенные в статье результаты климатического исследования (подробно представленного в готовящемся в настоящее время издании «Ледовые условия морей европейской части России») – это обобщение фактов, накопленных на протяжении 100–200 лет и менее в виде рядов системных инструментальных и визуальных наблюдений. Этот отрезок времени ничтожно мал по сравнению со временем существования климатической системы Земли (как твердой шарообразной планеты Солнечной системы), возраст которой с начала архейской эры по современным представлениям ученых насчитывает 3,5 млрд лет. Диапазон изменения климата очень велик. Однако ценность обобщения инструментально обеспеченного материала о состоянии природной среды регионов морей ЕТР состоит в том, что при всех ограничениях по климатической достоверности, о которых ниже будет идти речь, именно эти данные являются наиболее информативными и точными по сравнению с гипотетическими описаниями предыдущих периодов существования Земли.

В табл. 1 приведена информация об использованных рядах наблюдений при проведении исследования. Необходимо отметить проблемы, ограничивающие климатическую достоверность использованного материала.

1. В рядах ледовых характеристик имеются пропуски информации, причиной которых является либо отсутствие наблюдений в отдельные годы, либо непоступление информации в распоряжение ФГБУ «Гидрометцентр России» по каналам связи. Принимались во внимание только те ряды, для которых количество пропусков не превышает 25 % ряда.

2. Искажение информации могло происходить в ходе перевода информации в код КН-02 и передачи ее от первоисточника (гидрометеорологической станции) в ФГБУ «Гидрометцентр России», а также в ходе расшифровки данных кода (человеческий фактор). Для минимизации ошибок в сомнительных случаях проводилось сравнение информации соседних станций. Недостоверные случаи по возможности исключались из расчетов. Кроме

того, правдоподобие экстремальных ледовых ситуаций проверялось путем сопоставления их с сопутствующими метеорологическими (прежде всего температурными) условиями.

3. В определении ледовитости морей также имеются некоторые сомнительные моменты. Это связано прежде всего с тем, что до конца 1970-х гг. единственным способом получения данных о ледовой обстановке были визуальные наблюдения с берега, с самолётов и вертолетов, с кораблей. Недостатком ледовых авиационных разведок, выполняемых по фиксированным галсам, являлась неоднозначность определения положения границ ледяного покрова между галсами. В то же время полеты на низких высотах позволяли надежно фиксировать и включать в состав площади ледяного покрова при расчете ледовитости зоны начальных видов льда и редкого льда, а также определять наслоенность, торосистость, заснеженность и разрушенность ледяного покрова. Начиная с 1980-х гг. для определения положения кромок льда используются снимки низкого и среднего разрешения с искусственных спутников Земли (сканирование в видимом, инфракрасном, радиолокационном диапазонах, микроволновое радиометрическое сканирование). Для каждого сканера имеется ряд ограничений по достоверности дешифрирования ледовых условий:

- на снимках в видимом и инфракрасном спектрах нельзя определить границы льда в условиях облачности;
- низкое разрешение снимков даже в условиях хорошей видимости не всегда дает возможность зафиксировать наличие начальных видов льда или редкого льда;
- широко используемые в настоящее время для автоматического определения ледовитости данные микроволновых радиометров игнорируют начальные виды льда и редкий лед, а также могут интерпретировать мокрый лед любой сплоченность как чистую воду. Тем не менее обилие материалов наблюдений, большая работа по их проверке и анализу полученных результатов дают надежду на то, что попытка систематизировать сумму представлений о состоянии ледового режима морей европейской части России в XX – начале XXI вв. окажется полезной для теоретиков и практиков ледовых плаваний.

Палеоклиматические данные

Палеоклиматические данные, безусловно, имеют более низкую климатическую достоверность, чем непосредственные специальные визуальные и инструментальные данные наблюдений за ледовой обстановкой и температурным режимом в российских морях, перечисленные в табл. 1.

Само понятие «климат» претерпевало значительные изменения по мере накопления данных метеорологических наблюдений (прежде всего за температурой воздуха). В 60-х гг. XX века «климат» определялся как «многолетний режим погоды для данной местности», который «относительно неизменен за многолетние периоды, но подвергается коренным изменениям на протяжении геологических эпох» [11]. В конце XX века климат стал определяться, как «совокупность статистических свойств климатической системы за ограниченный промежуток времени»: 10, 30 лет и т.д. [2].

Со второй половины XIX века в качестве показателей изменения древних климатов используются литологические данные (информация о составе и происхождении осадочных пород), которые находятся в большой зависимости от погодных факторов. По представлениям палеоклиматологов, в последний миллион лет (относящийся к четвертичному периоду кайнозойской эры) ледниковые периоды продолжительностью 50–170 тысяч лет чередовались с межледниковыми периодами. При этом в ледниковой теории остается множество спорных вопросов и «белых пятен». Представления о смене ледниковых и межледниковых периодов за последний миллион лет очень приблизительны: по мнению разных исследователей, таких перемен было от 4 до 7. В табл. 2 приведена версия источников [2, 3] о предполагаемых временных рамках ледниковых и межледниковых периодов за последний миллион лет в Европе. Следует отметить, что в других источниках имеются сдвиги границ периодов на 5–20 тысяч лет и более. Предположительно в течение последних 2 млн лет средняя температура Земли изменялась в пределах $\pm 10^{\circ}\text{C}$ при переходе от ледниковых к межледниковым периодам.

Из анализа табл. 2 следует, что средняя продолжительность периода оледенения составляет 105 тысяч лет, а межледникового периода – 75 тысяч лет (что не соответствует ряду источников, в которых сообщается, что межледниковые периоды значительно короче ледниковых и длятся 15–20 тысяч лет). При этом три последних наиболее доказанных межледниковья имеют предположительно продолжительность более 50 тысяч лет. Поскольку современное межледниковье голоцена длится только 15 тысяч лет, вероятность скорого наступления нового ледникового периода невелика, и значительно вероятнее (правдоподобнее), что у человечества есть еще впереди, по крайней мере, 30 тысяч лет с относительно стабильными климатическими условиями.

Что такое «относительная стабильность», можно заключить из анализа климата Земли в период последнего межледниковья – голоцена. То, что мы называем «глобальным потеплением», в полной мере вписывается в понятие о естественных колебаниях

температуры воздуха, пики которых за последние всего лишь 6 тысяч лет уже несколько раз превышали современную температуру воздуха на 2–4 °С.

Наиболее подробные данные об изменениях климата за последние 150 тысяч лет получены при анализе кернов (колонок) континентального льда ледников Гренландии, Северной Земли, Антарктиды. В источнике [3] приведены графики отклонений от современных значений средней глобальной температуры воздуха за последние 27 тысяч лет, построенные как результат комплексных палеоклиматических исследований. Увязка данных этого графика с современной информацией о средней годовой температуре воздуха в Санкт-Петербурге позволила построить в качестве примера гипотетический график изменчивости средней годовой температуры воздуха в районе Санкт-Петербурга за этот период (рис. 1). Пунктирная линия на графике – данные реконструкции палеотемператур для последних 11 тысяч лет, полученные на основе анализа спорово-пыльцевых диаграмм (СПД) озерно-болотных отложений на разрезе «Кивач» (южная часть Карелии). Целый ряд аналогичных СПД по другим карельским разрезам подтверждают в целом данные реконструкции, приведенной на рис. 1 [8, 9].

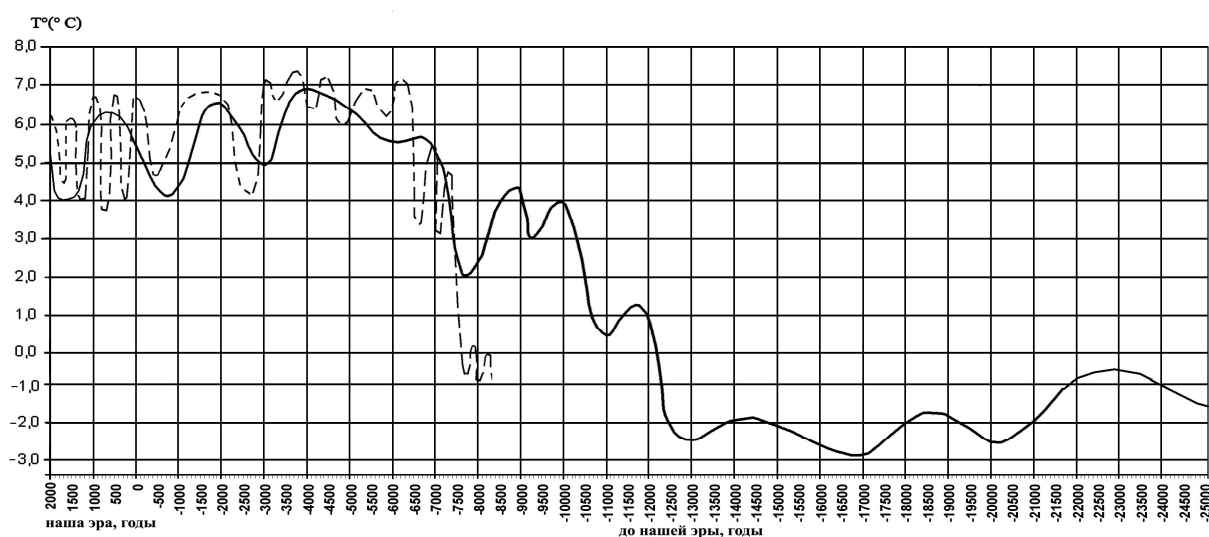


Рис. 1. График изменчивости средней годовой температуры воздуха в районе Санкт-Петербурга за 27 тысяч лет:

сплошная линия – результат комплексных палеоклиматических и «керновых» исследований, пунктирная линия – данные анализа СПД на разрезе «Кивач».

Последний ледниковый период определяет интервал 70–15 тысяч лет назад (продолжительность – примерно 55 тысяч лет). 25 тысяч лет назад начинается активное наступление на материк ледяного покрова, который достигает своего максимального распространения 18–20 тысяч лет назад. В это время Скандинавский полуостров и районы современных Белого и Балтийского морей были покрыты ледниковым панцирем толщиной

несколько сотен метров, а по данным некоторых источников – толщиной 2000 м и более [2, 10]. 15 тысяч лет назад, в XIII веке до н.э, началось активное потепление (последний межледниковый период), деградация ледников, повышение уровня океана.

Последние 10 тысяч лет, и особенно вторая половина голоцена, изучены детальнее, чем предшествующие периоды. Рис. 1 показывает, как график хода температуры, полученный для голоцена путем анализа СПД, уточняет общие представления о палеоклимате: если график для 27 тысяч лет «улавливает» изменения, характерный масштаб которых тысяча лет, то кривая для голоцена – попытка отобразить колебания с характерным масштабом 100 лет. Оба графика фиксируют климатический оптимум голоцена 5,5–6 тысяч лет назад (3,5–4 тысячи лет до н. э.), когда температура воздуха была на 2–4 °С выше современной. Приближаясь по временной оси к нашему времени, можно зафиксировать три ощутимых похолодания и последующих потепления. Тем не менее после оптимума сохранялась тенденция к снижению температуры.

Последнее значительное повышение температуры относится к IX–XIII вв. н. э. Этот период получил название малого климатического оптимума. Он был не столь тёплым, как климатический оптимум голоцена 6000 лет назад, но все-таки теплее нашего климата на 1,5–2 °С. С XIV века началось похолодание, известное как «малый ледниковый период», продолжавшееся до начала XIX века. Глобальная температура в это время была на 1,5–2 °С ниже современной. Поскольку этот период был сравнительно недавно, он, несмотря на свою относительную непродолжительность, оставил мощный след в исторических хрониках [3].

С начала XIX века началось постепенное повышение температуры воздуха, продолжающееся и теперь, что достоверно подтверждается результатами инструментальных наблюдений. Для европейской части России это подтверждают, например, данные по Санкт-Петербургу. Средняя годовая температура воздуха в районе Финского залива по 208-летнему ряду непрерывных наблюдений (с 1805 по 2012 г.) в районе Санкт-Петербурга составляет 4,3 °С. При этом, как следует из анализа графика межгодовой изменчивости температуры воздуха на рис. 2, средняя годовая температура воздуха в XIX веке составляла 4 °С, в XX веке – 5 °С, а в первые 12 лет XXI века – 6 °С.

Анализ накопившихся к настоящему времени результатов инструментальных наблюдений за температурой воздуха позволил сделать предположение о существовании в характере климатических изменений циклов с разными периодами (тяготеющих к 12, 20, 60, 80, 90 годам и т.д.), связанных с ритмами космической механики. Некоторые авторы справедливо связывают эти циклы с периодами вращения планет Солнечной системы, обращая при этом внимание на сложность характера влияния этих планет на климатическую

систему Земли. Наиболее вероятно влияние на климатическую систему гравитационных полей планет-гигантов: Юпитера (317,9 земных масс), Сатурна (95,2 земных масс), Урана (14,5 земных масс), Нептуна (17,1 земных массы). Есть смысл обратить внимание на их орбитальные периоды: Юпитер – 11,86 лет, Сатурн – 29,46 лет, Уран – 84,01 лет, Нептун – 164,79 лет, а также, например, на 20-летний цикл соединения Сатурна и Юпитера и на ряд циклов солнечной активности [3].

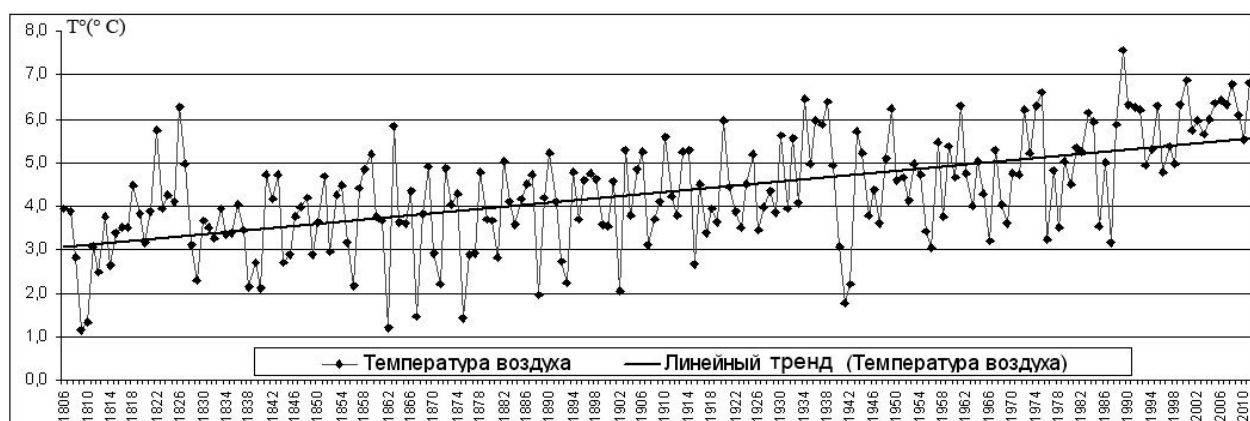


Рис. 2. Межгодовая изменчивость средней годовой температуры в районе ГМС Санкт-Петербург.

Из вышеизложенного можно сделать следующие гипотетические выводы:

1. Поскольку три предыдущих межледниковых периода длились не менее 50 тыс. лет, то можно предположить, что и настоящий межледниковый период, с начала которого прошло только 15 тысяч лет, будет иметь продолжительность не менее 30 тысяч лет.
2. Понижающийся в течение всего лишь шести тысячелетий тренд глобальной температуры не означает необратимость этого процесса, и вполне вероятно, что процесс потепления, начавшийся в XIX веке, может привести в ближайшую тысячу лет к достижению (а возможно и к перекрытию) климатического оптимума голоцена, наблюдавшегося 3,5–4 тысячи лет до н. э.
3. С течением времени при увеличении длины рядов системных визуальных и инструментальных наблюдений за метеорологическими и ледовыми параметрами будет повышаться степень правдоподобия (достоверности) не только представлений о современном климате, но и о климате предыдущих периодов жизни Земли. Выводы о закономерностях климатических изменений по данным рядов инструментальных наблюдений длиной менее 1000 лет недостаточно обоснованы.

Долгосрочный ледовый прогноз как исследовательский метод состояния климатической системы

В отделе морских гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России» в течение многих лет составляется долгосрочный прогноз ледовых условий на российских морях на предстоящую зиму. При этом прогнозируется ряд характеристик ледового сезона по портам российских 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 (МТЛ); дата окончательного очищения моря ото льда (ОО); продолжительность ледового периода (ЛП).

С целью повышения успешности прогноза ледовых условий на российских морях была предпринята попытка разработки новой методики прогноза. В качестве зависимых рядов для получения расчетных уравнений использовались наиболее полные ряды наблюдений за ледовыми характеристиками с начала организации наблюдений, приведенные в табл. 1.

В основу методики прогноза, подробно изложенной в [1, 5–7], заложено предположение о том, что на будущую суровость зимы и значения ледовых характеристик на морях 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:

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 , характеризующими зональные и меридиональные потоки тепла;

- среднемесячными значениями приземного давления в центрах действия атмосферы (ЦДА) и разностями этих значений на фиксированных створах ΔP_1 и ΔP_2 , характеризующими зональные и меридиональные потоки количества движения. По результатам анализа были выбраны наиболее значимые предикторы, которые вошли в окончательные уравнения.

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 второго порядка.

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

$$G = A_g \cdot \sin((N_i - N_0)2\pi / \Delta t) + C_g, \quad (1)$$

где N_i – номер текущего года; N_0 – номер узлового года (отклонение от генерального тренда равно нулю); A_g – амплитуда; C_g – свободный член, определяемые по регрессии между значениями $\sin((N_i - N_0)2\pi / \Delta t)$ и фактическими данными; Δt – период цикла.

На рис. 3 показано положение гармоники № 1 (генеральный тренд) и полиномиального тренда второго порядка для ряда СГДМ по Санкт-Петербургу. На рис. 4 – положение той же гармоники на оси времени, длина которой составляет 5 тысяч лет.

Проверим, как согласуются данные этой гармоники с климатическими представлениями, изложенными выше. Анализ рис. 4 показывает, что предпоследнее значительное повышение температуры, которому соответствуют минимальные значения СГДМ, как констатировалось выше, действительно относится к IX–XIII вв. н. э. (малый климатический оптимум). В соответствии с рис. 4 с XIV века действительно началось похолодание, известное как «малый ледниковый период», продолжавшийся до начала XIX

века. Далее началось постепенное повышение температуры воздуха (уменьшение СГДМ), продолжающееся и теперь (и находящееся в соответствии с рис. 4 на половине пути к следующему экстремальному значению очередного климатического оптимума). Таким образом, чисто теоретически найденная гармоника подтверждает палеоклиматические представления, что служит доказательством ее реального существования.

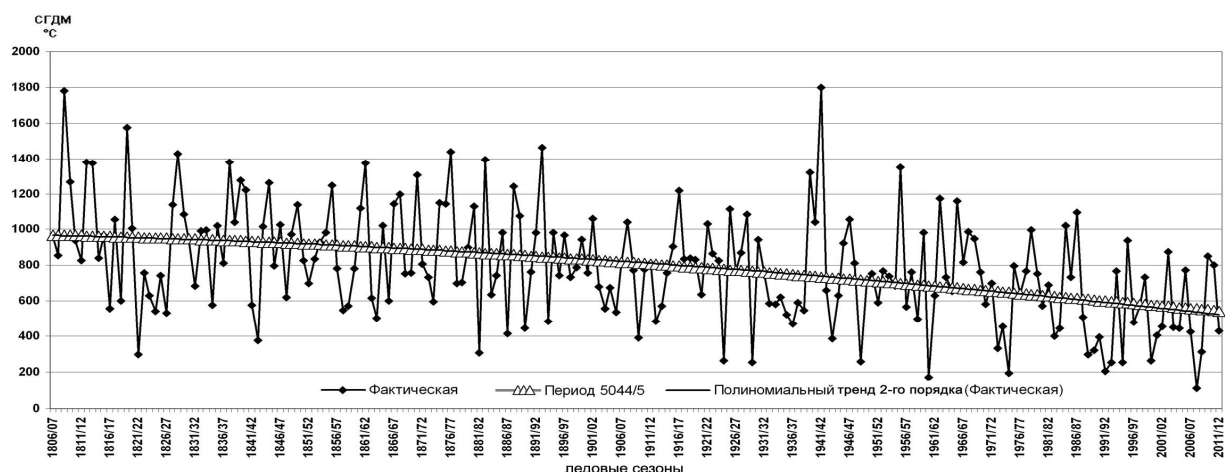


Рис. 3. Положение гармоники № 1 (генеральный тренд) и полиномиального тренда 2-го порядка для ряда СГДМ по Санкт-Петербургу.

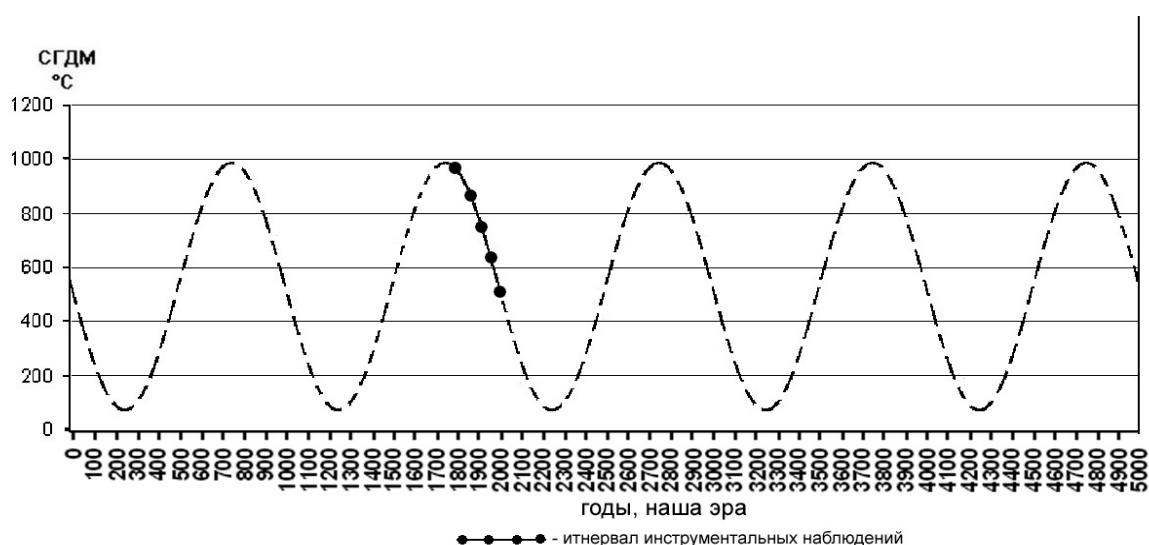


Рис. 4. Положение гармоники № 1 (генеральный тренд) для ряда СГДМ по Санкт-Петербургу на оси времени до 5000 г. н. э.

На рис. 5 показано положение гармоники № 2 и полиномиального тренда четвертого порядка для отклонения СГДМ по Санкт-Петербургу от генерального тренда.

На рис. 6 показано положение гармоники № 3 и полиномиального тренда шестого порядка для отклонения СГДМ по Санкт-Петербургу от генерального тренда.

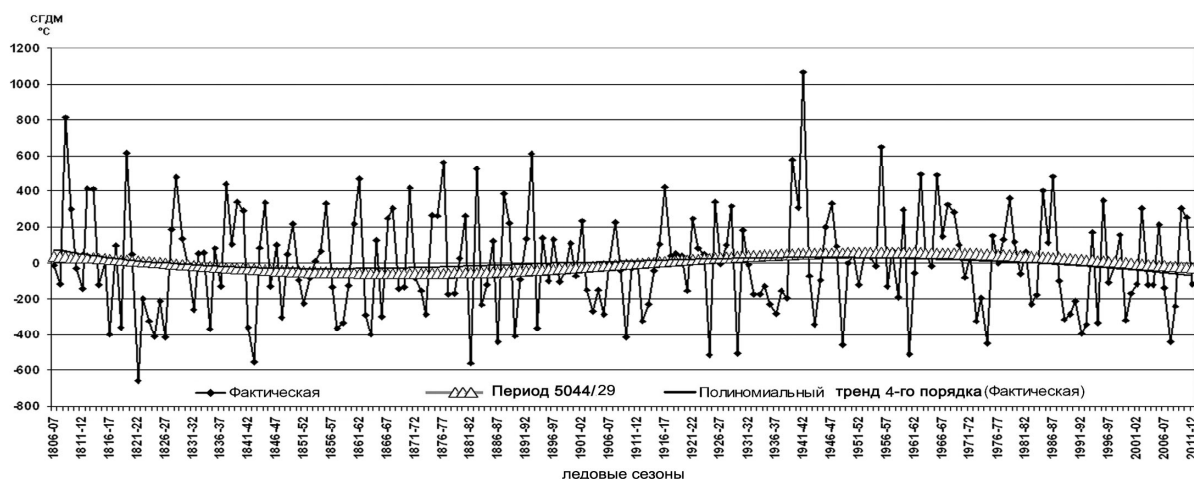


Рис. 5. Положение гармоники № 2 и полиномиального тренда 4-го порядка для отклонения СГДМ по Санкт-Петербургу от генерального тренда.

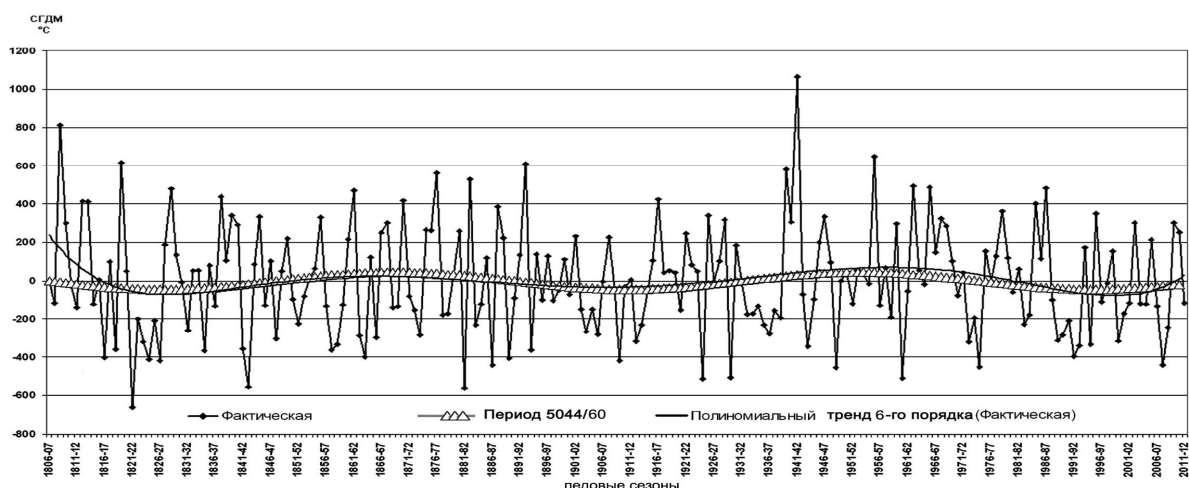


Рис. 6. Положение гармоники № 3 и полиномиального тренда 6-го порядка для отклонения СГДМ по Санкт-Петербургу от генерального тренда.

Как показывает рис. 4, узловыми годами гармоники № 1, для которых выполняется условие $\sin((N_i - N_0)2\pi / \Delta t) = 0$, являются годы, соответствующие среднему значению СГДМ, близкому к 600 °C. Для гармоник № 2 и № 3, описывающих отклонение фактических значений СГДМ от генерального тренда, узловым годам соответствуют нулевые ординаты. Оказалось, что для этих трех визуально определяемых гармоник существуют общие узловые годы, повторяющиеся в периоде, равном $\Delta T = 5044$ лет. В частности, общий узловой год попадает на начало современного летоисчисления, т. е. $N_0 = 0$. Из представления об общности узлового года для трех гармоник и наличии

глобального периода было выдвинуто предположение, что N_0 – величина, постоянная для ряда гармоник, сумма которых способна аппроксимировать изменчивость СГДМ внутри глобального периода. Тогда значение Δt для этих гармоник должно определяться из выражения

$$\Delta t = \Delta T / m, \quad (4)$$

где ΔT – глобальный период; m – целые числа.

На рис. 3–6 видно, что гармоники № 1, № 2, № 3 действительно визуально определимы. Остальные гармоники найдены по повышенным значениям коэффициентов корреляции между фактическими отклонениями от генерального тренда и синусоидами с периодами, полученными путем последовательного деления величины глобального периода, равной 5044 годам, на целые числа от 2 до 2500.

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

В третьем компоненте методики долгосрочного прогноза суммы найденных гармоник аппроксимируют значения СГДМ и ледовых характеристик морей европейской части России. 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.

Обращает на себя внимание близость периодов отдельных найденных гармоник с периодами колебания гравитационных воздействий (орбитальных периодов) Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна, а также с основными циклами солнечной активности [3], что вряд ли может быть случайностью. В табл. 4 приведены числовые характеристики, характеризующие это соответствие.

На рис.7 в качестве примера приведены результаты расчета ледовитости северной части Белого моря с помощью ансамблевого (трехкомпонентного) метода для морей ЕТР.

Средняя для всех пунктов эффективность ансамблевого метода по зависимым и независимым рядам составляет для всех элементов ледового режима по европейским морям России (СГДМ, ПП, ОО, ЛП, МТЛ, ЛП) 20–25 % [7]. Таким образом, расчет ледовых характеристик ансамблевым методом дал вполне правдоподобный результат.

Ряд уравнений, полученных в процессе разработки метода прогноза, в совокупности является статистической моделью эволюции ледяного покрова неарктических морей. Поскольку во всех уравнениях весовые коэффициенты (ВК) нормированы единообразно, т. е. от 0 до 0,7 по абсолютной величине, то пространственное распределение их значений при

широкой географии пунктов, для которых осуществлялся 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. Такой подход позволяет выявить причинно-следственные связи в процессе воздействия термобарических полей на характеристики будущего ледового сезона и дать количественную оценку активности этих связей.

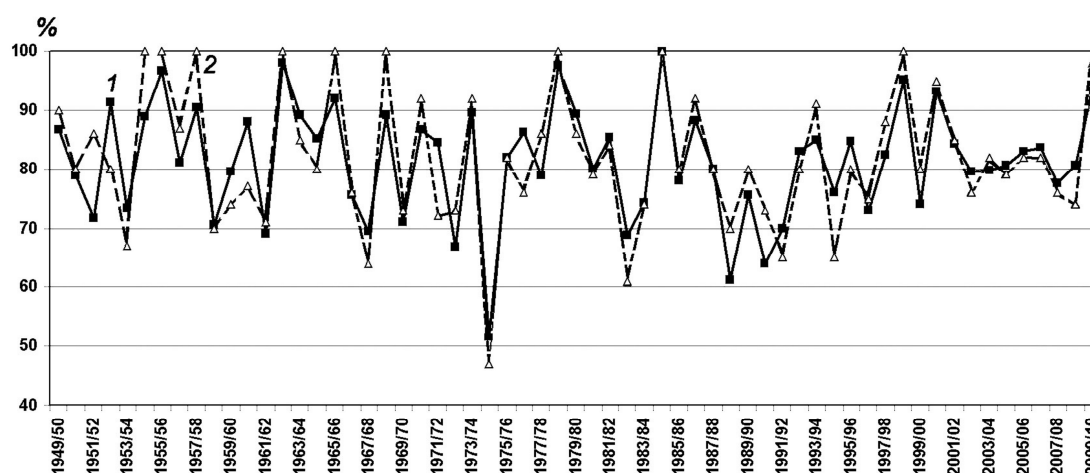


Рис. 7. Результаты расчетов ледовитости Белого моря:

1 – прогностическая величина; 2 – фактическая величина.

В работе [4] было прослежено, как в хронологической последовательности (с января по сентябрь, предшествующие ледовому сезону) осуществляется действие отдельных предикторов на будущую СГДМ. На рис. 8 в качестве примера представлено распределение ВК, определяющих влияние на будущую СГДМ трех наиболее значимых сентябрьских предикторов.

Изменения ледового режима европейской части России на рубеже XX–XXI вв.

Изучение данных об изменении приземных значений температуры воздуха и давления в трех ЦДА в последние 30 лет, по сравнению с 118-летним периодом наблюдений, показало, что существенно изменился температурный режим только в районе сибирского максимума: средняя годовая температура повысилась на 1 °С, а зимние температуры – на 1–2 °С. При этом уменьшились значения давления в районах сибирского максимума и исландского минимума: годовые – на 0,4–0,7 гПа, зимние за отдельные месяцы – на 1–2 гПа. Зато

существенно увеличились значения давления в районе азорского максимума: годовые – на 0,8 гПа, зимние за отдельные месяцы – на 2–3 гПа. Такое перераспределение термобарических параметров основных ЦДА и привело к изменениям ледового режима морей, описанным ниже.

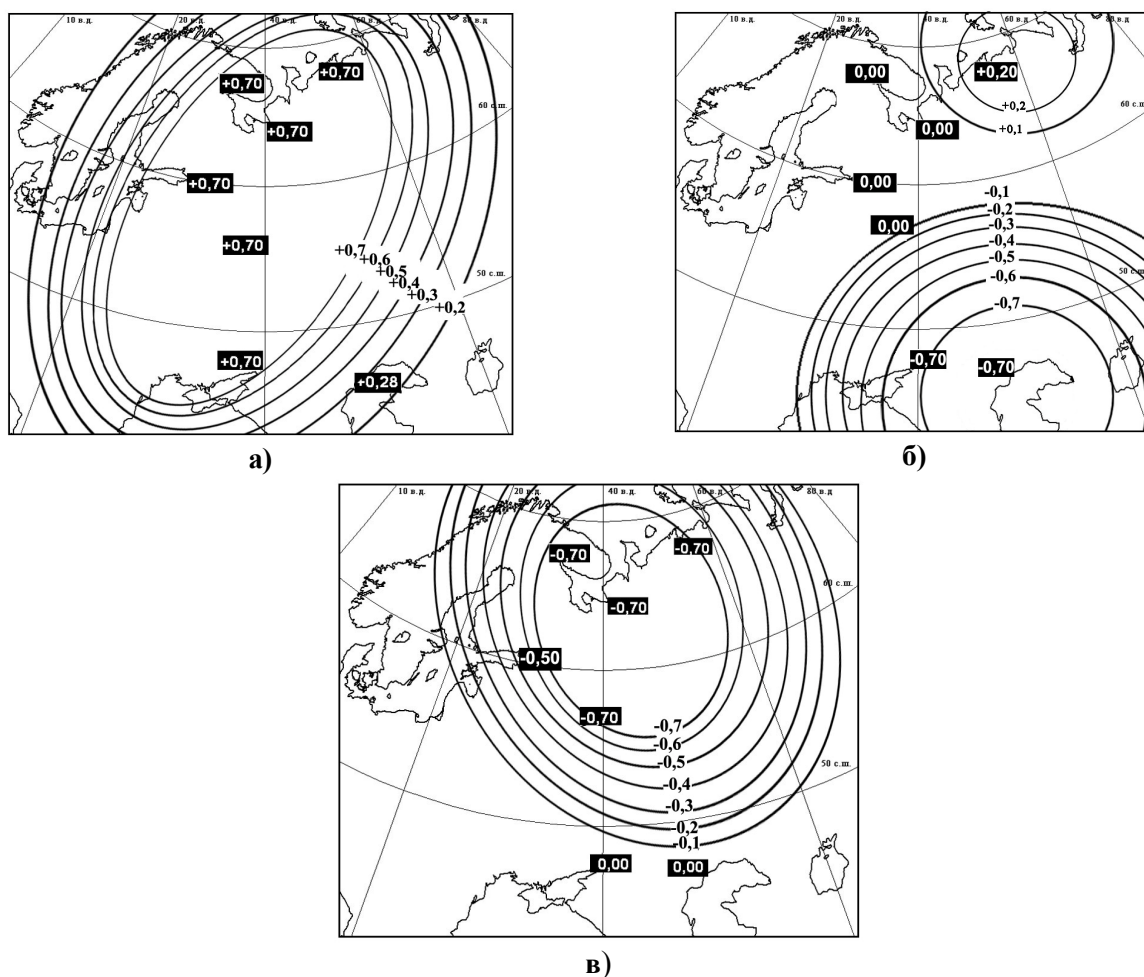


Рис. 8. Распределение ВК, определяющих влияние на СГДМ будущего ледового сезона наиболее значимых предикторов в сентябре: давление в районе Сибирского максимума (а), температура воздуха в Архангельске (б), температура воздуха в Санкт-Петербурге(в).

В табл. 5 приведены средние, максимальные и минимальные значения сумм градусодней мороза (СГДМ) за 100-летний период (XX век), за последние 30 лет и за первые 12 лет XXI века. Анализ таблицы показывает, что в последнее 30-летие, по сравнению с XX веком, средние СГДМ, как для северных, так и для южных морей, уменьшились на 106–108 °С. Такое равномерное уменьшение абсолютных значений СГДМ привело к тому, что

акватории северных морей в процентном отношении уменьшили потерю тепла в течение холодного периода года в среднем на 5 %, а акватории южных морей – на 32 %.

В первые 12 лет XX века процесс потепления шел более интенсивно в северных морях. Средняя СГДМ для акваторий северных морей уменьшилась, по сравнению с XX веком, на 253 °С, а для южных морей – на 123 °С.

В последнее 30-летие ни по одному морю не был перекрыт максимум XX века для сумм градусодней мороза, а на первые 12 лет XXI века не приходится ни одного максимума последнего 30-летнего периода. При этом половина абсолютных минимумов СГДМ зафиксирована именно в последний 12-летний период.

В последние 110 лет зимний температурный режим всех европейских морей России характеризуется уменьшением значений СГДМ со средней скоростью от 1 до 2,6 °С в год. Средние скорости уменьшения СГДМ в XX – начале XXI вв. ранжируются следующим образом: Финский залив (Санкт-Петербург) – 2,60 °С в год, Азовское море (Ростов-на-Дону) – 2,39 °С в год, Северный Каспий (Астрахань) – 1,91 °С в год, Баренцево море (Баренцбург) – 1,35 °С в год, Белое море (Архангельск) – 1,04 °С в год, Черное море (Одесса) – 0,96 °С.

В табл. 6 представлены количественные характеристики последствий этого процесса.

Анализ табл. 6 показывает, что за последнее 30-летие, по сравнению с данными за XX век, и в северном, и в южном регионе ЕТР количество мягких зим выросло в среднем на 13–14 %, а в первые 12 лет XXI века – на 20–25 % (критерии суровости рассчитаны для XX века).

Характерным является то, что наибольшая изменчивость повторяемости мягких зим зафиксирована в Финском заливе, где увеличение для последнего 30-летия составило 40 %. Этим подтверждается тот факт, что именно повышение активности зональной атмосферной циркуляции в последние годы, характеризующей рост влияния Атлантики, – основная причина уменьшения суровости зим в европейской части России. В последние годы в Финском заливе вероятность наступления умеренной зимы резко упала, по сравнению со средней вероятностью в XX веке практически с 60 до 30–40 %, что свидетельствует о возможности наиболее высоких, по сравнению с другими морями, климатических контрастов именно в этом районе ЕТР.

Критериям суровой зимы в первые 12 лет XXI века оказались соответствующими только три зимы: 2000–2001 гг. для восточного района юго-западной части Карского моря, 2002–2003 гг. для Черного моря, 2010–2011 гг. для Белого моря.

Уменьшение суровости европейских зим привело к сдвигам в наступлении ледовых фаз на российских морях. В табл. 7 приведены количественные данные о сдвиге в последние

годы дат первого появления льда (ПП) на морях в сторону более поздних сроков, дат очищения моря ото льда (ОО) в сторону более ранних сроков, а также уменьшении продолжительности ледового периода (ЛП), по сравнению со средними многолетними значениями.

Анализ таблицы показывает, что во всех морях ЕТР в последние годы для ледовых фаз имели место сдвиги дат в сторону облегчения ледовых условий. Так, в последние 30 лет даты первого появления льда сдвинулись, по сравнению со средними многолетними значениями, в сторону более поздних сроков для всех морей в среднем на 3–8 дней, даты очищения моря ото льда в сторону более ранних сроков – на 5–8 дней, продолжительность ледового периода уменьшилась на 1–2 недели.

В течение первых 12 лет XXI века даты первого появления льда сдвинулись в сторону более поздних сроков для всех морей в среднем на 7–16 дней, даты очищения моря ото льда – на 7–12 дней, продолжительность ледового периода уменьшилась на 16–24 дня.

Следует отметить, что 12-летний период не только не является показательным с точки зрения объективной оценки климатических изменений в XXI веке в целом, он не является репрезентативным для характеристики макроциркуляционной эпохи, продолжительность которой составляет около 25 лет. Он лишь иллюстрирует термическое состояние воздушных масс над ЕТР в начале XXI века как конечную на данный момент стадию длительной тенденции повышения температуры воздуха.

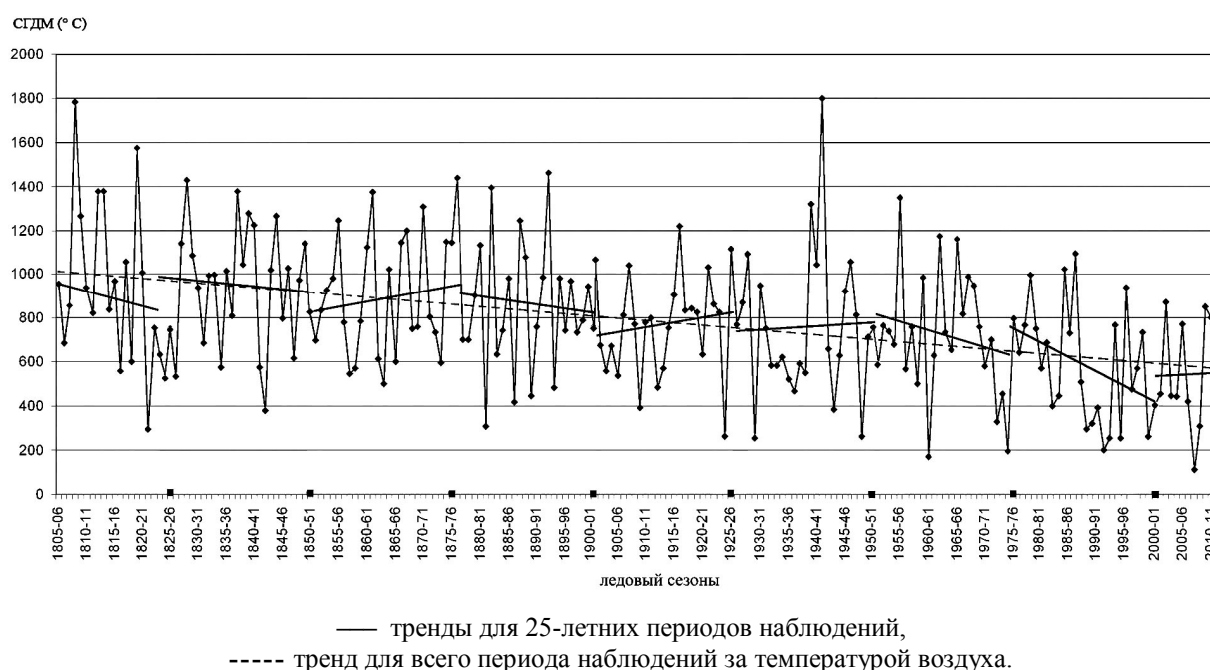


Рис. 9. Линейные тренды СГДМ в Санкт-Петербурге для 25-летних периодов в XIX и XX веках:

Из анализа рис. 9 следует, что, несмотря на общий понижающийся тренд для СГДМ в Санкт-Петербурге, и в XIX, и XX веках существовали такие 25-летние периоды, в рамках которых наблюдались восходящие тренды. Таковыми являлись третье 25-летие XIX века, а также первая и вторая четверти XX века.

В табл. 8 приведены обобщенные данные об изменении толщин припайного льда, свидетельствующие об уменьшении мощности льда в морях ЕТР.

Выводы

Основные изменения в ледовом режиме замерзающих морей ЕТР, произошедшие за 30 лет (на рубеже XX–XXI вв.), следующие:

- суммы градусодней мороза как для северных, так и для южных морей уменьшились в среднем на 100 °С;
- повторяемость мягких зим увеличилась для всех морей в среднем на 14 %; повторяемость суровых зим уменьшилась для морей северной части ЕТР на 7 %, южной части ЕТР – на 13 %;
- даты первого появления льда сдвинулись в сторону более поздних сроков для всех морей в среднем на 3–8 дней, даты очищения моря ото льда в сторону более ранних сроков – на 5–8 дней, продолжительность ледового периода уменьшилась на 1–2 недели;
- средние толщины припайного льда на момент наибольшего развития ледяного покрова в морях северной части ЕТР уменьшились на 1–5 см, максимальные толщины льда уменьшились на 5–20 см;
- средняя ледовитость на момент наибольшего развития ледяного покрова на всех морях, кроме юго-западной части Карского моря и Воронки Белого моря, уменьшилась на 3–8 % (в юго-западной части Карского моря пока сохраняется среднее значение наибольшей за ледовый сезон ледовитости, равное 100 %, а в Воронке Белого моря – 76 %).

Список использованных источников

1. Абузяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. – М., Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 287 с.
2. Борисенков Е.П., Пасецкий В.М. Летопись необыкновенных явлений природы за 2,5 тысячелетия. – СПб: Гидрометеиздат, 2003. – 235 с.
3. Дмитриев А.А., Белязо В.А. Космос, планетарная, климатическая изменчивость и атмосфера полярных регионов. – СПб: Гидрометеиздат, 2006. – 258 с.

4. *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.
5. *Думанская И.О.* Метод долгосрочного прогноза ледовых условий на Белом и Азовском морях // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 83–104.
6. *Думанская И.О.* Методика долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеоспектр. – 2009. – № 4. – С. 88–96.
7. *Думанская И.О.* О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 11. – С. 64–77.
8. *Елина Г.А., Филимонова Л.В.* Палеорастиельность позднеледниковья – голоцена восточной Фенноскандии и проблемы картографирования. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – 143 с.
9. *Климанов В.А., Елина Г.А.* Изменения климата на северо-западе Русской равнины в голоцене // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 274, № 5. – С. 1164–1167.
10. *Лосев К.С.* Климат: вчера, сегодня...и завтра?. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 175 с.
11. *Чеботарев А.И.* Гидрологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 222 с.

Поступила в редакцию 10.10.2013 г.

**Ряды наблюдений за ледовыми характеристиками,
использованные при проведении настоящего исследования и пропуски данных в них**

Море	Район моря или пункт наблюдений	Характеристика	Число лет набл.	Пропуск данных, %	Район моря или пункт наблюдений	Характеристика	Число лет набл.	Пропуск данных, %
Карское	Амдерма	СГДМ	73	0	Амдерма	ТЛ	73	2
	о. Диксон	СГДМ	91	0	Усть-Кара	ТЛ	78	5
	Амдерма	ЛФ	78	5	Марре-Сале	ТЛ	73	0
	Усть-Кара	ЛФ	78	10	Харасавей	ТЛ	34	6
	Марре-Сале	ЛФ	79	3	о. Белый	ТЛ	79	13
	Харасавей	ЛФ	45	10	Диксон	ТЛ	89	2
	о. Белый	ЛФ	79	13	Соп. Карга	ТЛ	71	2
	о. Диксон	ЛФ	79	0	Дудинка	ТЛ	64	12
	Сопочная Карга	ЛФ	57	18	Игарка	ТЛ	49	6
	Новый Порт	ЛФ	32	5	Тамбей	ТЛ	43	15
	ЮЗ часть моря	ПНЗ	73	0	м. Каменный	ТЛ	43	0
		Л	73	0	Новый Порт	ТЛ	19	5
Баренцево	Нарьян-Мар	СГДМ	85	0	Бугрино	ТЛ	89	2
	Баренцбург	СГДМ	100	0	Инди́га	ТЛ	48	15
	Бугрино	ЛФ	89	2	Константиновский	ТЛ	48	4
	Сев. Колгуев	ЛФ	71	0	Варандей (Шар)	ТЛ	48	25
	Инди́га	ЛФ	89	9	Белый Нос	ТЛ	72	0
	Константиновский	ЛФ	53	0	Малые Кармакулы	ТЛ	72	1
	Варандей (Шар)	ЛФ	72	4	о. Хейса	ТЛ	55	7
	Белый Нос	ЛФ	63	2	Все море	Л	106	14
	Мал. Кармакулы	ЛФ	63	14	ЮВ часть моря	Л	85	0
Белое	о. Хейса	ЛФ	53	8	Абрамовский	ЛФ	101	3
	Архангельск	СГДМ	179	0	Моржовец	ЛФ	121	5
	Архангельск	ЛФ	131	0	Канин Нос	ЛФ	97	4
	о. Мудьюг	ЛФ	101	2	о. Мудьюг	ТЛ	99	12
	Унский маяк	ЛФ	90	2	Унский маяк	ТЛ	74	12
	Зимнегорский	ЛФ	104	1	Онега	ТЛ	81	6
	Онега	ЛФ	97	1	Кемь-Порт	ТЛ	74	15
	Кемь-Порт	ЛФ	96	6	Разнаволок	ТЛ	83	6
	Разнаволок	ЛФ	95	3	Соловки	ТЛ	63	6
	Соловки	ЛФ	72	0	Гридино	ТЛ	83	13
	Гридино	ЛФ	88	6	Ковда	ТЛ	74	8
	Ковда	ЛФ	74	13	Кандалакша	ТЛ	83	7
	Кандалакша	ЛФ	89	8	Умба	ТЛ	73	15
	Умба	ЛФ	59	20	Воронка моря	Л	62	0
Балтийское	Сосновец	ЛФ	103	4	Приморск	ЛФ	62	2
	Санкт-Петербург	СГДМ	207	0	Лисий Нос	ТЛ	88	8
	Санкт-Петербург	ЛФ	92	0	Кронштадт	ТЛ	102	22
	Кронштадт	ЛФ	124	0	Выборг	ТЛ	83	14
	Лисий Нос	ЛФ	90	0	Все море	Л	283	0
	Усть-Луга	ЛФ	92	13	Финский залив	Л	62	0
Азовское	Выборг	ЛФ	67	0	Тамань	ЛФ	77	20
	Ростов-на-Дону	СГДМ	131	0	Керчь	ЛФ	88	8
	Таганрог	ЛФ	90	5	Таганрог	ТЛ	89	6
	Мариуполь	ЛФ	88	4	Мариуполь	ТЛ	86	10
	Бердянск	ЛФ	89	11	Все море	Л	63	0
Черное	Геническ	ЛФ	88	10	Николаев	ТЛ	73	5
	Одесса	СГДМ	131	0	Очаков	ТЛ	73	15
	Николаев	ЛФ	96	5	СЗ часть	Л	63	0
	Очаков	ЛФ	87	8	Форт Шевченко	ЛФ	80	25
Каспийское	Астрахань	СГДМ	167	0	о. Большой Пешной	ТЛ	83	24
	о. Бол. Пешной	ЛФ	83	20	о. Искусственный	ТЛ	60	15
	о. Искусственный	ЛФ	71	19	Форт Шевченко	ТЛ	59	25
	о. Тюлений	ЛФ	73	24	Северный Каспий	Л	85	0

Примечание: СГДМ – сумма градусодней мороза, ЛФ – ледовые фазы, ТЛ – толщина припайного льда, Л – ледовитость, ПНЗ – площадь Новоземельского массива.

Таблица .2

**Данные о предполагаемых временных рамках ледниковых и межледниковых периодов
за последний миллион лет в Европе**

№	Название	Время, лет тому назад	Климатические экстремумы, лет тому назад	Период, лет	Отклонения температуры воздуха от современной в периоды климатических экстремумов, ° С
1	Дунайское оледенение – первый максимум	1200–960 тыс.	970 тыс.	240 тыс.	≈ –3...–5
2	Первый интерстадиал	960–930 тыс.		30 тыс.	≈ +2...+4
3	Дунайское оледенение – второй максимум (Сетуньское)	930–815	855 тыс.	115 тыс.	≈ –4...–6
4	Второй интерстадиал (Акуловское межледниковье)	815–730 тыс.		85 тыс.	≈ +2...+4
5	Дунайское оледенение – третий максимум (Донское оледенение)	730–620 тыс.	685 тыс.	110 тыс.	≈ –4...–8
6	Межледниковый период	620–595 тыс.		25 тыс.	≈ +2...+4
7	Гюнцское оледенение	595–545 тыс.		50 тыс.	≈ –5...–9
8	Гюнц-миндельское межледниковье	545–490 тыс.		55 тыс.	≈ +2...+4
9	Миндельское (Оксское) оледенение	490–430 тыс.		60 тыс.	≈ –5...–10
10	Миндель-рисское межледниковье (Лихвинское межледниковье)	430–280 тыс.	335-300 тыс.	150 тыс.	≈ +2...+4
11	Рисское (Днепровское) оледенение	280–180 тыс.		100 тыс.	≈ –5...–10
12	Рисс-вюрмское межледниковье	180–70 тыс.	130-75 тыс. (Микулинское межледниковье)	105 тыс.	≈ +1...+2
13	Вюрмское (Валдайское) оледенение	70–15 тыс.	20-18 тыс.	55 тыс.	≈ –5...–10
14	Межледниковье голоцена	15–0 тыс.	6-5.5 тыс.	15 тыс.	≈ +2...+4 (оптимум)

Примечание. Первое название оледенения соответствует оледенению Альп, второе (в скобках) – оледенению ЕТР.

Таблица 3

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

№ гармоники	m	Δt	r		№ гармоники	m	Δt Санкт-Петербург	r	
			Санкт-Петербург	Архангельск				Архангельск	Санкт-Петербург
1 (ген. тренд)	5	1008,80	0,40	0,23	16	952	5,30	0,13	0,22
					17	998	5,05	0,16	0,12
2	29	173,93	0,07	0,14	18	1024	4,92	0,14	0,11
3	60	84,07	0,12	0,10	19	1082	4,66	0,10	0,15
4	198	25,47	0,10	0,10	20	1154	4,37	0,13	0,18
5	232	21,74	0,18	0,15	21	1192	4,23	0,10	0,10
6	278	18,14	0,10	0,11	22	1280	3,94	0,18	0,08
7	372	13,56	0,10	0,14	23	1494	3,38	0,13	0,13
8	398	12,67	0,11	0,12	24	1640	3,08	0,17	0,19
9	450	11,21	0,14	0,12	25	1782	2,83	0,14	0,10
10	516	9,78	0,17	0,10	26	1876	2,69	0,10	0,11
11	544	9,27	0,18	0,13	27	1948	2,59	0,12	0,11
12	648	7,84	0,20	0,10	28	2098	2,40	0,17	0,19
13	666	7,57	0,05	0,12	29	2156	2,34	0,12	0,05
14	778	6,48	0,07	0,15	30	2234	2,26	0,24	0,16
15	892	5,65	0,10	0,15	31	2484	2,03	0,18	0,18
Суммарные коэффициенты корреляции r								0,80	0,74

Таблица 4

**Соответствие периодов гармоник с периодами колебаний
гравитационных воздействий планет и солнечной активности на природные процессы Земли**

Влияние планет	Планетарный цикл, лет	Номер гармоники и ее период, лет
Нептун	Орбитальный период = 164,79	№ 2 = 173,93
Уран	Орбитальный период = 84,01	№ 3 = 84,07
Сатурн	Орбитальный период = 29,46	№ 4 = 25,47
Сатурн и Юпитер	Цикл соединения = 20,00	№ 6 = 18,14
Солнце	Цикл солнечной активности = 22,00	№ 5 = 21,74
Солнце	Цикл солнечной активности = 11,00	№ 9 = 11,21
Солнце	Цикл солнечной активности = 4,60	№ 19 = 4,66
Юпитер и Марс	Цикл соединения = 2,20	№ 30 = 2,26

Таблица 5

**Средние, максимальные и минимальные значения сумм градусодней мороза (СГДМ)
за различные периоды времени**

Море, район моря	Гидрометеорологическая станция	СГДМ, °С								
		в XX веке			за последнее 30-летие			за 12 лет XXI века		
		сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.
Карское, ЮЗ часть	Диксон	4430	5803	2952	4335	5168	2952	4120	5134	2952
Баренцево	Баренцбург	2285	3860	1199	2141	3015	1199	1857	2303	1199
	Нарьян-Мар	2380	3633	1433	2313	3361	1494	2182	2587	1631
Белое	Архангельск	1425	2302	751	1354	2157	827	1266	1754	827
Финский залив	С.-Петербург	700	1800	113	535	1096	113	530	873	113
Азовское	Ростов-на-Дону	400	1277	0	273	668	19	255	524	19
Черное	Одесса	146	639	0	100	472	0	100	327	0
Каспийское	Астрахань	460	1240	37	314	688	37	282	538	59
Среднее по северным морям, °С		2244	3480	1290	2136	2959	1317	1991	2530	1344
Среднее по южным морям, °С		335	1052	12	229	609	19	212	463	26
Изменение по сравнению с XX веком для северных морей, °С		0	0	0	-108	-521	46	-253	-950	54
Изменение по сравнению с XX веком для южных морей, °С		0	0	0	-106	-443	7	-123	-589	14
Изменение по сравнению с XX веком для северных морей, %		0	0	0	-5	-15	4	-11	-27	4
Изменение по сравнению с XX веком для южных морей, %		0	0	0	-32	-42	58	-37	-56	117

Примечание. В данной таблице, а также в табл. 6 и 9, к северным морям условно отнесены Карское, Баренцево, Белое и Балтийское, к южным морям – Азовское, Черное и Каспийское.

Таблица 6

**Повторяемость мягких (М), умеренных (У) и суровых (С) зим
в различные периоды времени**

Море, район моря	Гидрометеорологическая станция	Повторяемость зим, %								
		в XX веке			за последнее 30-летие			за 12 лет XXI века		
		М	У	С	М	У	С	М	У	С
Карское, ЮЗ часть	Диксон	14	67	19	23	67	10	42	50	8
Баренцево	Баренцбург	20	64	16	27	66	7	50	50	0
	Нарьян-Мар	16	65	19	17	70	13	25	75	0
Белое	Архангельск	21	63	16	30	53	17	42	50	8
Финский залив	С.-Петербург	20	60	20	60	33	7	58	42	0
Азовское	Ростов-на-Дону	22	56	22	33	60	7	42	58	0
Черное	Одесса	23	54	23	33	54	13	42	50	8
Каспийское	Астрахань	19	61	20	40	53	7	42	58	0
Среднее по северным морям		18	64	18	31	58	11	43	53	4
Среднее по южным морям		21	57	22	35	56	9	42	55	3
Изменение, по сравнению с XX веком, для северных морей					13	-6	-7	25	-11	-14
Изменение, по сравнению с XX веком, для южных морей					14	-1	-13	21	-2	-19

Таблица 7

Сдвиг средних дат наступления ледовых фаз по данным гидрометеорологических станций

Море, район моря	Сдвиг, дни					
	за последнее 30-летие			за 12 лет XXI века		
	даты ПП в сторону поздних сроков	даты ОО в сторону ранних сроков	ЛП в сторону уменьшения	даты ПП в сторону поздних сроков	даты ОО в сторону ранних сроков	ЛП в сторону уменьшения
Карское море, ЮЗ часть, к востоку от о. Белый	3–4	1–5	5–8	7–10	5–12	14–16
Карское море, ЮЗ часть, к западу от о. Белый	3–4	7–14	12–17	6–15	12–14	19–29
Баренцево море	1–4	4–7	6–11	4–11	5–13	12–22
Белое море	4–8	4–7	8–14	7–21	5–10	14–25
Балтийское море, Финский залив	4–8	3–8	10–14	9–15	4–8	14–21
Азовское море	2–8	6–10	8–14	7–21	7–14	14–28
Черное море	2–9	7–10	9–19	8–18	7–11	17–23
Каспийское море	5–16	5–8	14–21	10–19	9–14	21–30
Среднее	3–8	5–9	8–13	7–16	7–12	16–24

Таблица 8

**Изменение средней и максимальной толщины льда
на момент наибольшего развития ледяного покрова**

Море, район моря	Уменьшение толщины льда на момент наибольшего развития ледяного покрова, см			
	средней		максимальной	
	за последнее 30-летие	за 12 лет XXI века	за последнее 30-летие	за 12 лет XXI века
Карское море, ЮЗ часть	1–5	5–10	20–25	30–45
Баренцево море	1–5	5–10	20–30	20–65
Белое море, кроме Кандалакшского залива	1–5	5–15	10–20	20–40
Белое море, Кандалакшский залив	0	0	5–20	5–30
Балтийское море, Финский залив	1–5	10–15	2–5	10–15
Азовское море, кроме Таганрогского залива	1–5	15–30	2–5	15–30
Азовское море, Таганрогский залив	5–10	10–25	5–10	10–25
Черное море	0–5	0–5	20–25	20–25
Каспийское море	5–15	15–35	5–15	15–35
Среднее по северным морям	1–5	5–10	10–20	15–45
Среднее по южным морям	5–10	10–30	5–15	15–30