

Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.515.8 (589.1)

Климатические вариации арктического фронта и ледовитости Баренцева моря зимой

© 2014 г. А.Н. Золотокрылин, Т.Б. Титкова, А.Ю. Михайлов

Институт географии РАН, Москва

azolotokrylin1938@yandex.ru

Статья принята к печати 18 декабря 2013 г.

Арктика, Арктический фронт, Баренцево море, ледовитость, приземная температура воздуха, Субарктика, центры циклонов, циклоническая активность.

Arctic, Arctic Front, Barents Sea, cyclone center, cyclonic activity, ice coverage, Subarctic, surface air temperature.

По данным реанализа (UEA CRU и NCEP/NCAR) исследованы размещение климатического арктического фронта в Атлантико-Европейском секторе и изменение ледовитости Баренцева моря зимой в периоды современного потепления (1981–2010 гг.) и похолодания (1948–1980 гг.) Арктики. Установлено, что арктический фронт имеет двойственную структуру и состоит из основного (над морями Северной Атлантики) и вторичного (в северной части континента). В рассмотренные периоды похолодания и потепления Арктики размещение основной и вторичной ветвей этого фронта квазистационарно. Рост локализации центров циклонов в западных секторах Баренцева моря в 1991–2007 гг. подтверждает модельные оценки увеличения возникновения циклонических возмущений в атмосфере над свободной ото льда поверхностью Баренцева моря, что вызывает положительную обратную связь и способствует уменьшению площади ледяного покрова.

Введение

Гидрометеорологические и ледовые условия в Арктике в 1930–40-х годах формировались на повышенном температурном фоне. За ним последовал холодный период, охватывающий 1950–1984 гг. С середины 1980-х годов началось новое повышение температуры, которое продолжается и в настоящее время [2, 9, 11]. Потепление в Арктике сопровождается уменьшением площади ледяного покрова, значительно ускорившимся во второй половине первого десятилетия XXI в. [3, 12]. Пока точные причины этого процесса окончательно не выяснены. В данной статье наблюдается потепление Арктики рассматривается на основе концепции расположения климатических фронтов [13], так как вопрос о размещении арктического фронта в периоды похолодания и потепления Арктики важен как в климатическом, так и в общегеографическом плане.

Цель работы – исследовать положение климатического арктического фронта в Атлантико-Европейском секторе и изменение ледовитости Баренцева моря зимой в периоды современного похолодания (1948–1980 гг.) и потепления Арктики (1981–2010 гг.). С одной стороны, она состоит в подтверждении квазистационарности положе-

ния арктического фронта в условиях меняющейся циклонической активности в высоких широтах; с другой стороны, исследование направлено на понимание механизма так называемого «арктического усиления», когда наиболее сильное потепление в последние десятилетия отмечается в арктическом регионе. Среди возможных причин потепления – изменение атмосферной циркуляции с аномально сильной адвекцией тепла в высокие широты и перенос океанического тепла в атлантический сектор Арктики [1, 5, 16, 17]. Возможна и положительная обратная связь между притоком тёплых атлантических вод в Баренцево море и площадью его ледяного покрова [10, 18]. Допускается, что ветры, вызванные циклонами над свободной ото льда поверхностью Баренцева моря, могут усиливать приток тёплых атлантических вод и способствовать ещё большему сокращению площади ледяного покрова моря. Однако ветры в Баренцевом море зависят от положения и формы циклонов, поэтому обратная связь может быть как положительная, так и отрицательная. Сравнение размещения арктического фронта и его вариаций в синоптическом масштабе с изменением ледовитости Баренцева моря может помочь решить ряд дискуссионных вопросов.

Методика исследования

Термин «климатический фронт» означает среднее положение фронтов определённого географического типа в определённом районе [13, 14]. Арктический фронт разделяет арктические воздушные массы и воздушные массы умеренных широт. Для получения объективных оценок положения арктического фронта рассматривается Атлантико-Европейский сектор (40–90° с.ш., 40° з.д. – 90° в.д.). Периоды исследования – 1948–1980 и 1981–2010 гг. При рассмотрении вопроса о географическом положении арктического фронта мы исходили из того, что этот фронт проходит в районе наиболее часто повторяющихся синоптических фронтов, а следовательно, и в районе максимальных значений модуля горизонтального градиента приземной температуры. Синоптические фронты формируются в зонах пониженного давления, поэтому район с повышенной повторяемостью центров циклонов может также указывать на климатический фронт. Расположение фронтов может также соответствовать «ведущему потоку» в средней тропосфере (областям повышенных скоростей зонального ветра).

Для определения положения арктического фронта выполняется ряд операций.

1. Рассчитывается повторяемость вдоль отрезка меридиана максимума величины горизонтального температурного градиента на изобарических поверхностях АТ1000 и АТ850; на каждом отрезке меридиана (расстояние между меридианами 2,5° долготы) за каждые сутки определяется широта положения (средняя для отрезка 2,5° широты) максимального градиента температуры. Далее эти случаи суммируются за весь климатический период и нормируются на длину всей выборки ($N \cdot M$, где N – число лет, M – число дней в месяце). В результате таких расчётов получается поле относительной частоты образования максимального горизонтального градиента температуры в ячейке 2,5° × 2,5°. Модуль температурного градиента Gt на высоте изобарической поверхности АТ1000 имеет размерность °С/2,5° широты и рассчитывается по формуле:

$$Gt = (Gx^2 + Gy^2)^{0,5};$$

$$Gx = (t_{i,j+1} + t_{i+1,j+1} - t_{i,j} - t_{i+1,j}) / (2 \cos \varphi);$$

$$Gy = (t_{i,j+1} + t_{i+1,j+1} - t_{i,j} - t_{i+1,j}) / 2,$$

где i – индекс ячейки по долготе (увеличивается в восточном направлении); j – индекс ячейки по широте (увеличивается в северном направлении); φ – широта ячейки.

2. Исследуются поля повторяемости центров циклонов. Под повторяемостью центров циклонов по данным о геопотенциальной высоте АТ1000 подразумевается частота попадания центров циклонов в ромбовидную область с вершинами в точках $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$, где расстояние между двумя первыми точками равно 5° долготы, а между двумя последними – 5° широты. При этом критерием такого попадания служит условие (логическое выражение)

$$(h_{i,j} < h_{i-1,j}) \& (h_{i,j} < h_{i+1,j}) \& (h_{i,j} < h_{i,j-1}) \& (h_{i,j} < h_{i,j+1}),$$

где h – геопотенциальная высота АТ1000. Физический смысл критерия – «центральная точка должна быть меньше величины h для всех четырёх ближайших точек». Длина выборки при определении средней частоты событий в нашем случае равна $4m$ (4 – число сроков в сутках, m – число дней в месяце).

Исходные данные включают в себя два реанализа. Первый подготовлен в Университете Восточной Англии (UEA CRU) (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncsr/>). Он состоит из двумерного массива значений различных метеоэлементов в узлах географической сетки, размером 2,5° по широте и 2,5° по долготе (четыре метеорологических срока для Н1000 и суточные значения для температуры на изобарических поверхностях), за все дни в период с 1948 по 2007 г. Второй реанализ (NCEP/NCAR) представлен месячными полями давления, направления и скорости ветра на поверхностях 850 и 700 гПа. Единица измерения в таблицах и на соответствующих картах – среднее количество центров циклонов за сезон (три месяца) в данной ячейке, т.е. результат не зависит от величины выборки. Учитывается уменьшение площади ячейки, для которой считаются центры циклонов, с широтой. В качестве независимого материала для сравнения использовались данные о траекториях внетропических циклонов из <http://stratus.ssec.wisc.edu/products/cyclones/cyclones.html> и http://nsidc.org/data/docs/daac/nsidc0423_cyclone/.

Результаты исследования

Первый результат относится к детализации географического размещения арктического фронта. На рис. 1 показано положение этого фронта зимой в периоды похолодания и потепления Арктики. Видно, что арктический фронт от исландского минимума сдвигается к северу в восточном направлении и над морями Арктики принимает уже широтное положение. Другое широтное образование повышенных повторяемостей центров ци-

клонов формируется южнее арктического фронта над Скандинавией и севером Восточной Европы (см. рис. 1). Его возникновение можно объяснить термическими различиями подстилающей поверхности (тёплый океан – холодная суша), что может быть причиной развития здесь циклогенеза. Следующая причина повышения повторяемости центров циклонов над материком – проникновение в Северную Европу циклонов из средних широт. Независимо друг от друга и арктический фронт, и рассмотренное выше образование отличаются резко увеличенными горизонтальными градиентами температуры на высоте поверхности 850 мб, что характерно при переходе от одной воздушной массы к другой. Это обстоятельство позволяет рассматривать две ветви арктического фронта: основную и вторичную. Арктический фронт разделяет морские арктические и умеренные массы воздуха над Северной Атлантикой, а над Норвежским и Баренцевым морями его основная ветвь отделяет морской арктический воздух от трансформированных над сушей умеренных масс. При трансформации над сушей умеренный воздух охлаждается и приобретает новые свойства (субарктические), которые отличаются от свойств как умеренного, так и арктического воздуха. Вторичный арктический фронт (его можно назвать тогда субарктическим) представляет собой границу между субарктическими массами и умеренными. Отметим, что средиземноморская ветвь полярного фронта, разделяющая умеренные и тропические массы, проходит в это время года вблизи 40° с.ш. (см. рис. 1).

Несмотря на отличия методик и разнесённых по времени исходных данных, показанные Т. Бержероном [14] и С.П. Хромовым [13] на карте арктические фронты в Атлантико-Европейском секторе незначительно отличаются от размещения главного арктического фронта, проведённого нами (см. рис. 1). Сравнение положения арктического фронта в 1951–1980 и 1981–2007 гг. показывает, что его климатические вариации малы и не выходят за пределы точности определения центров циклонов ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$). Таким образом, положение ветвей арктического фронта можно считать квазистационарным и для периода похолодания, и для периода потепления Арктики. Небольшие климатические вариации арктического фронта – следствие взаимного погашения амплитуд межгодовых колебаний положения центров циклонов. В синоптическом масштабе максимальная амплитуда колебаний центров зимних циклонов может достигать 5° широты (рис. 2). Важно также отме-

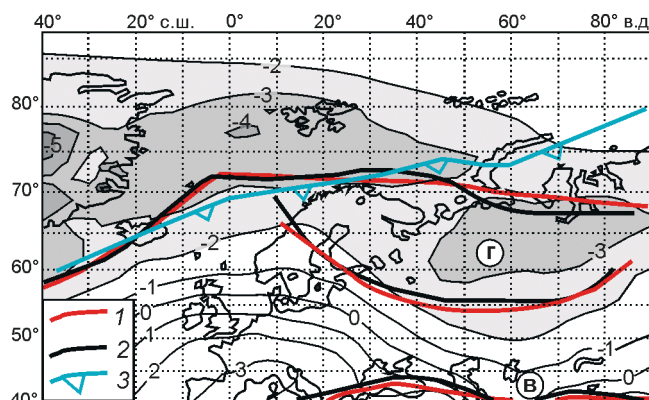


Рис. 1. Размещение главного (Г) и вторичного (В) арктических фронтов и изменение поля приземного давления (мб) (декабрь–февраль) в периоды:

1 – 1948–1980 гг., 2 – 1981–2007 гг.; 3 – арктический фронт по С.П. Хромову

Fig. 1. Placing the primary (Г) and secondary (В) arctic fronts and change in the field of surface pressure (mb) (December–February) in the periods:

1 – 1948–1980, 2 – 1981–2007; 3 – Arctic Front (S.P. Khromov)

тить существование низкочастотной составляющей этих колебаний, что может быть следствием разделения на «тёплый» и «холодный» периоды, которые в Баренцевом море приходятся соответственно на 1989–2013 и 1963–1987 гг. Это видно по данным о температуре воды на Кольском меридиане [20]. Квазистационарны также локализации областей максимальных градиентов температуры на приземной карте и на высоте поверхности 850 мб. Различия есть в величине контрастов приземной температуры в полосе 2,5° широты, которые в период похолодания достигают 10° и составляют 8° в тёплый период.

Второй результат работы касается так называемого арктического усиления. На рис. 1 изолиниями показано изменение поля приземного давления в тёплый период 1981–2010 гг. по отношению к холодному 1948–1980 гг. Оно позволяет оценить роль атмосферной адвекции тепла в Арктику. В период потепления наибольшее падение давления наблюдалось над Гренландией, Гренландским, Норвежским и Баренцевым морями, а также над северной частью континента, что соответствовало усилению циклонической активности. Так, от периода похолодания к периоду потепления в широтной полосе 70–87,5° с.ш. средняя повторяемость центров циклонов в одной ячейке увеличилась с 1,9 до 2,1, а в полосе 60–70° с.ш. – с 4,6 до 4,9. Усиление циклонической активности ведёт к положительной аномалии арктической осцилляции, а она уже давала

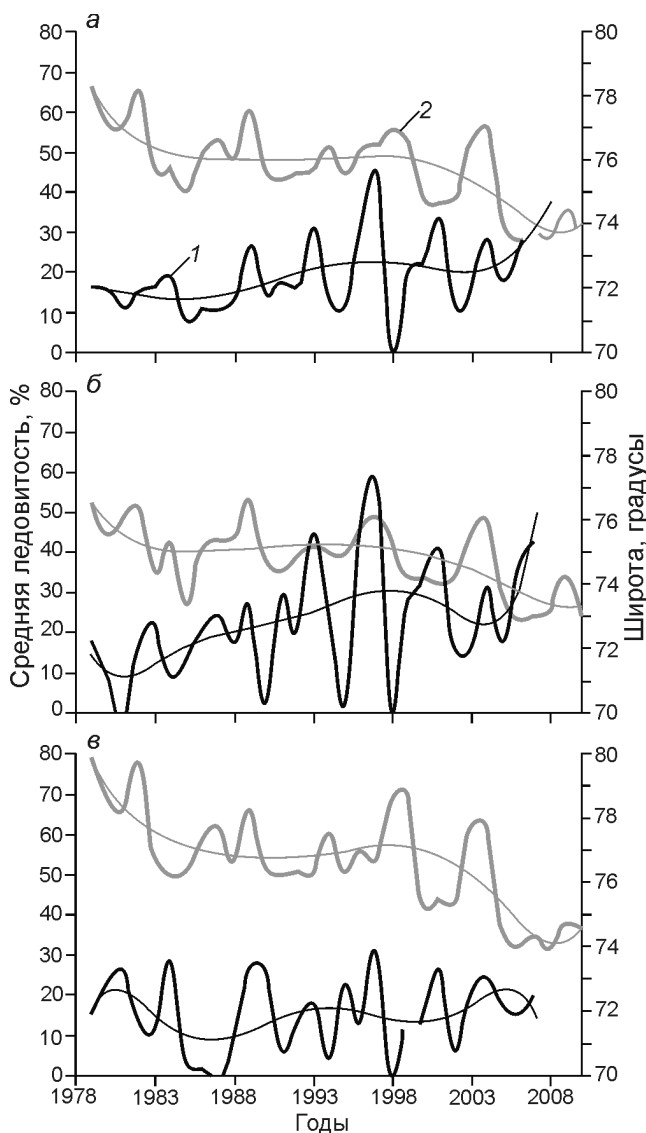


Рис. 2. Межгодовое изменение максимальной повторяемости центров циклонов (шкала справа, 1) и средней ледовитости Баренцева моря (2) (%), аппроксимированные полиномом 6-й степени:

a – 20–60° в.д.; *б* – 20–40° в.д.; *в* – 40–60° в.д.

Fig. 2. Interannual change repeatability maximum cyclone centers (right scale, dotted line) and the average sea ice coverage the Barents Sea (full line) (%) approximated by a polynomial second degree:

a – 20–60° E; *б* – 20–40° E; *в* – 40–60° E

положительную обратную связь, принося тёплые воздушные массы в арктические моря, в частности в Баренцево море [17].

В формировании обратной связи важную роль играет локализация центров циклонов в Баренцевом море. В таблице показано изменение повторяемости центров циклонов в климатические периоды 1991–2007 и 1979–1990 гг. в четырёх секторах Ба-

Изменение относительного числа центров циклонов в Баренцевом море по секторам*

Широтный сектор	Долготный сектор	
	Западный (20–40° в.д.)	Восточный (40–60° в.д.)
Северный (75–85° с.ш.)	38/56	52/48
Южный (65–75° с.ш.)	151/190	209/193

*В числителе – данные для 1979–1990 гг., в знаменателе – для 1991–2007 гг.

ренцева моря. Видно, что в разные эпизоды в северных секторах повторяемость центров циклонов примерно в 3 раза меньше, чем в южных. В эпизод 1991–2007 гг. повторяемость центров циклонов увеличилась в основном в западных секторах, в то время как в восточных она даже уменьшилась. Локализация циклонов в большей степени возросла в северо-западном секторе, чем в юго-западном, т.е. в эпизод наименьшей ледовитости моря. Этот вывод иллюстрируют рис. 2 б, в, на которых изображены низкочастотные составляющие изменений максимальной повторяемости центров циклонов и ледовитости Баренцева моря. Сдвиг на север центров циклонов сильнее вызывает уменьшение ледовитости моря в западных секторах. В северо-восточном секторе, где наблюдалось максимальное падение ледовитости, что хорошо видно на рис. 3, падение повторяемости циклонов привело к ослаблению восточных ветров, замедляющих приток тёплых атлантических вод в этот сектор.

Обсуждение результатов

Заключение о квазистационарном положении зимнего арктического фронта свидетельствует о сохранении географической целостности и устойчивости общих свойств арктических воздушных масс несмотря на продолжающееся глобальное потепление и усиление циклонической активности в Арктике. Данный результат вновь подчёркивает плодотворность генетической классификации климатов Б.П. Алисова [4], базирующейся на выделении климатов нескольких циркуляционных зон с преобладающими в них воздушными массами определённого типа круглый год или каждое полугодие. Основой для выделения зон служит положение климатологических фронтов зимой и летом.

Вопрос о более широкой трактовке арктического фронта, как основного, так и вторичного, связан с единым взглядом на изменение циклонической активности арктических циклонов и циклонов, вторгающихся в Арктику из средних широт.

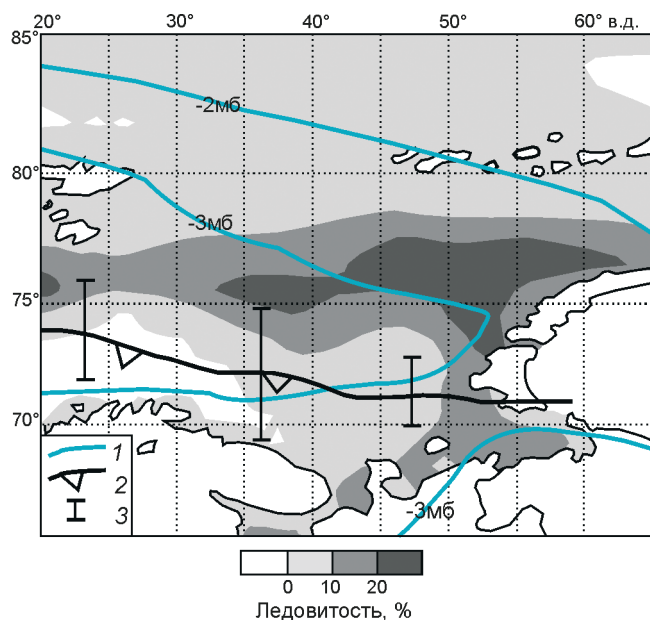


Рис. 3. Изменение ледовитости Баренцева моря в 1979–1990 и 1991–2007 гг. и изменение поля давления в 1951–1980 и 1981–2010 гг.

1 – изменение поля давления, мб; 2 – арктический фронт 1979–2007 гг.; 3 – std арктического фронта (пояснения см. текст)

Fig. 3. Change in sea ice coverage in the Barents Sea 1979–1990 and 1991–2007 and the change of the pressure field 1951–1980 and 1981–2010.

1 – the change of the pressure field, mb; 2 – Arctic Front 1979–2007; 3 – std Arctic Front (explanations see the text)

При концентрации на суше центров циклонов арктического и неарктического происхождения образуется вторичный арктический фронт. Синхронное климатическое изменение повторяемости центров циклонов как в морской Арктике (70–90° с.ш.), так и в Субарктике (60–70° с.ш.) позволяет рассматривать циклоническую активность в этих регионах в качестве единого целого. Синхронизированные фазы и амплитуды вариаций циклонической активности в морской Арктике и Субарктике играют основную роль в определении циклонической активности в Арктике в целом [19]. Об этом свидетельствует и то обстоятельство, что циклоническая активность в Арктике возросла в период её потепления, в то время как в средних широтах она уменьшилась [19]. Отметим также, что количество циклонов, вторгающихся из средних широт в Арктику, в последние десятилетия выросло.

Установленная связь между притоком тёплых атлантических вод и ледовитостью Баренцева моря зимой, используемая в прогнозах ледовитости [5–8], приобретает особое значение в связи с модельным воспроизведением образования сильного

источника турбулентного потока тепла от поверхности моря в атмосферу, который вызывает конвекцию и формирование циклонической завихренности в нижней тропосфере [15]. Как показали эксперименты с МОЦА [15], положительная аномалия притока тёплых вод вызывает уменьшение площади ледяного покрова, а также усиление циклонической циркуляции и западных ветров между северной оконечностью Норвегии и Шпицбергом. Это приводит к дальнейшему росту океанического (как и атмосферного) притока тепла в Баренцево море, формируя положительную обратную связь между притоком и площадью ледяного покрова. Данные таблицы подтверждают усиление циклонической активности в западных секторах Баренцева моря.

Заключение

Арктический фронт в восточной части Атлантико-Европейского сектора в зимний период имеет двойственную структуру и состоит из основной и вторичной ветвей. Основной арктический фронт размещается над морями Северной Атлантики и отделяет арктический воздух от умеренного морского в западной части и трансформированного над континентом умеренного (субарктического) воздуха в восточной части. Вторичный арктический фронт размещается в северной части континента и отделяет субарктическую воздушную массу от умеренной континентальной. Основанием для отнесения вторичного фронта к арктическому стала синхронность изменения циклонической активности на широтах 70–85° и 60–70° с.ш. Основной и вторичный арктические фронты квазистационарны, т.е. в климатическом масштабе слабо подвержены изменению циклонической активности, определяемой по изменению повторяемости центров циклонов в периоды похолодания и потепления Арктики. Циклоническая активность возросла синхронно в Арктике и Субарктике от эпизода похолодания (1948–1980 гг.) к современному потеплению. Выявленный опережающий рост повторяемости центров циклонов в двух западных секторах Баренцева моря в 1991–2007 гг. подтверждает модельные оценки о повышении завихренности в атмосфере над свободной ото льда поверхностью Баренцева моря как основного звена положительной обратной связи между притоком тёплых атлантических вод и ледовитостью Баренцева моря.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №13-05-00031).

Литература

1. *Алексеев Г.В.* Роль циркуляции атмосферы и других факторов в формировании климата Арктики // Формирование и динамика современного климата Арктики / Под ред. Г.В. Алексеева. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 27–46.
2. *Алексеев Г.В., Родионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е.* Климатические изменения в Арктике и Северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 1 (84). С. 67–80.
3. *Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Харланенкова Н.Е.* Климатические изменения в морской Арктике в начале XXI века // Метеорологические и геофизические исследования. М.: Европейские издания, 2011. С. 3–25.
4. *Алисов Б.П.* Географические типы климатов // Метеорология и гидрология. 1936. № 6. С. 16–25.
5. *Визе В.Ю.* Причины потепления Арктики // Советская Арктика. 1937. № 1. 104 с.
6. *Захаров В.Ф.* Льды Арктики и современные природные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 136 с.
7. *Зубакин Г.К.* Ледяной покров морей Северо-Европейского бассейна. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 160 с.
8. *Мионов Е.У.* Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: изд. ААНИИ, 2004. 320 с.
9. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 227 с.
10. *Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М.* Роль границ морского льда и температуры поверхности океана в изменениях регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.
11. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М.* Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 149–160.
12. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.П., Клячкин С.В., Фролов С.В.* Морской лёд // Методы оценки последствий изменений климата для физических и биологических систем. М.: изд. Росгидромета, 2012. С. 400–429.
13. *Хромов С.П.* Географическое размещение климатологических фронтов // Изв. ВГО. 1950. Т. 82. Вып. 2. С. 126–137.
14. *Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M.* The early-twentieth-century warming in the Arctic – A possible mechanism // Journ. of Climate. 2004. № 17. P. 4045–4057.
15. *Bergeron T.* Richtlinien einer Dynamis henk Klimatologie // Meteorologische Zeitschrift. 1930. № 47. P. 246–262.
16. *Dickson R.R., Osborn T.J., Hurrell J.W., Meincke J., Blindheim J., Adlandsvik B., Vinje T., Alekseev G., Maslowsky T.* The Arctic Ocean response to the North Atlantic oscillation // Journ. of Climate. 2000. № 13. P. 2671–2696.
17. *Semenov V.A., Latif M.* The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice // The Cryosphere. 2012. № 6. P. 1231–1237. doi:10.5194/tc-6-1-2012
18. *Schlichtholz P.* Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas // Geophys. Research Letters. 2011. № 38. lfq L05705, doi:10.1029/2010GL045894
19. *Zhang X., Walsh J.I., Zhang J., Batt U.S., Ikeda M.* Climatology and interannual variability of Arctic cyclone activity: 1948–2002 // Journ. of Climate. 2004. № 17. P. 2300–2317.

Summary

Climatologic Arctic front location at Atlantic-European section and changes in Barents sea ice coverage during periods of Arctic warming (1981–2010) and cooling (1948–1980) are studied by reanalysis data (UEA CRU and NCEP/NCAR). As we demonstrate, Arctic front structure is more complex than was considered before. Arctic front consists of two branches, main one over Atlantic ocean, Norwegian and Barents seas and secondary one over Northern Europe. Main front divides arctic and temperate air masses over Atlantics as well as arctic and subarctic (transformed temperate masses over Northern Europe) masses over Arctic seas. Secondary (subarctic) branch separates subarctic air masses from continental temperate masses. Main and secondary Arctic front branches remain quasi-stationary during observed periods. On climatic scale, Arctic front is conservative with respect to cyclonic activity change during periods of warming and cooling in Arctic. Cyclonic activity, which is determined by cyclone centres repeatability, increased synchronously in Arctic and Subarctic from cooling period (1948–1980) to actual warming. Evidences to meet hypothesis on positive feedback between warm Atlantic water masses inflow and Barents sea wintertime ice coverage. This hypothesis became particularly important in relation with model reproduction of turbulent warm heavy stream that cause convection and cyclonic turbulence in lower troposphere. In feedback forming, cyclone centres localization matters; their repeatability is calculated for climatic episodes 1991–2007 (small ice coverage) and 1979–1990 (big ice coverage) in Barents sea's four sections. During climatic episode 1991–2007 cyclone centres repeatability increased mostly in western sections, while in eastern sections repeatability decreased. At the same time, cyclone localization increase mostly in north-west section, comparing with south-western one. Cyclone centres localization shift north cause ice coverage decrease there.