

Арктический фронт и ледовитость Баренцева моря в зимний период

Т.Б. Титкова, А.Ю. Михайлов, В.В. Виноградова

*Институт географии РАН, 119017 Москва, Россия
E-mail: ttitkova@yandex.ru*

В работе наблюдаемое изменение ледовитости Баренцева моря рассматривается в связи с положением основной ветви Арктического фронта, которая в зимний период проходит над акваторией Баренцева моря и отделяет арктический воздух от умеренного морского. Детализировано географическое положение главной ветви Арктического фронта над Баренцевым морем в зимний период 1981–2010 гг.

Показано, что на фоне значительного изменения ледовитости Баренцева моря положение Арктического фронта остается квазистационарно. Произошло углубление барической ложбины и усиление интенсивности циклонической деятельности над западными районами Баренцева моря. Это привело к смещению зоны наиболее частого прохождения циклонов на Арктическом фронте к северу на 2° широты в западной части Баренцева моря, при неизменном выходе циклонов на сушу в районе устья р. Печора. Это усилило положительную обратную связь между притоком тёплых атлантических вод и как следствие уменьшением ледовитости Баренцева моря в этих районах. Зона максимальных градиентов температуры на арктическом фронте стационарна и прослеживается севернее среднего положения центров циклонов. Нарастание количества льда в Баренцевом море лежит между зоной наиболее частого прохождения центров циклонов и полосой максимальных изменений температуры на арктическом фронте на АТ1000 гПа. Наибольший градиент ледовитости максимально приближен к зоне наибольших градиентов температуры на АТ1000 гПа. Эти параметры изменяются синхронно. Снижение градиента ледовитости на 2%, за последние 30 лет, при смещении траекторий циклонов к северу, сопровождается уменьшением температурного контраста на 2° С за тот же период, на фоне географической стационарности температурных градиентов.

Ключевые слова: Арктический фронт, градиент температуры, ледовитость, максимальная повторяемость центров циклонов, поле приземного давления

Введение

Интерес к климатологическому Арктическому фронту (АФ) в акватории Баренцева моря обусловлен вопросом устойчивости его географического положения в условиях глобального потепления и меняющейся ледовитости этого района. Влияние атмосферной циркуляции на изменения площади покрытия льдом в Арктике и, в частности, в Баренцевом море, несомненно в виду большого вклада атмосферных переносов в формирование ее энергетического баланса (Алексеев, 2004). Современное потепление Арктики, наблюдаемое с середины 1980-х годов, и продолжающееся в начале XXI века сопровождается значительным уменьшением площади ледяного покрова (Фролов и др., 2007, 2012; Гудкович и др., 2008). В состоянии ледяного покрова арктических морей (его площади, толщины, сплоченности и других характеристик) выявлены относительно длительные однонаправленные изменения. Эти тренды лучше выражены в морях атлантического сектора (Гренландском, Баренцевом и Карском) (Семенов и др., 2012). Причина резкого сокращения количества арктических льдов связана с потеплением климата, главным образом, повышением температуры воздуха (Бужин, Гудкович, 2011), но изменения циркуляции атмосферы также повлияли на сокращение льда.

Среди возможных механизмов потепления Арктического бассейна и, в частности, акватории Баренцева моря, предполагается изменение атмосферной циркуляции с аномально сильной адвекцией тепла в высокие широты и переносом океанического тепла в атлантическом секторе Арктики (Schlichtholz, 2011). В развитии данного процесса может возникать положительная обратная связь между притоком теплых атлантических вод и площадью ледяного покрова в Баренцево море (Семенов и др., 2012; Semenov, Latif, 2012). Ветры, вызванные циклонами над непокрытой льдом участком Баренцева моря, могут усиливать приток теплых атлантических вод и еще больше уменьшить ледовый покров моря. Но, так как ветры в Баренцевом море зависят от положения и формы циклонов, то обратная связь может быть как положительная, так и отрицательная.

В данной работе наблюдаемое потепление Арктики и, как следствие, уменьшение ледовитости Баренцева моря, рассматривается в связи с положением основной ветви АФ (Хромов, 1950), которая в зимний период проходит над акваторией Баренцева моря и отделяет арктический воздух от умеренно морского.

Ширина реальных атмосферных фронтов незначительна - несколько десятков километров, толщина по вертикали – несколько сотен метров, но они возникают и перемещаются в пределах огромных территорий, и их максимальная повторяемость в зоне климатического фронта лишь ненамного превышает повторяемость в соседних областях. Климатический атмосферный фронт характеризуется минимумом поля приземного давления, максимальной повторяемостью центров циклонов и максимальными величинами горизонтальных градиентов приземной температуры (Михайлов и др., 2012). В различные климатические периоды основная ветвь арктического климатического фронта в географическом масштабе квазистационарна (Золотокрылин и др., 2014), но даже небольшое смещение повторяемости прохождения арктического атмосферного фронта способно влиять на изменение площади и границы ледяного покрова Баренцева моря

Методика

При рассмотрении вопроса о географическом положении арктического фронта мы исходили из того, что этот фронт проходит в районе наиболее часто повторяющихся синоптических фронтов и, следовательно, в районе максимальных значений модуля горизонтального градиента температуры. Так как синоптические фронты формируются в зонах пониженного давления, то район повышенной повторяемости центров циклонов может также указывать на климатический фронт (Михайлов и др., 2012; Золотокрылин и др., 2014). Таким образом, определение положения АФ оценивалось на основе трех состав-

ляющих: по минимуму поля приземного давления, по максимальной повторяемости центров циклонов на Н1000 гПа и максимальных величин горизонтальных градиентов температуры на АТ1000 гПа.

Исходные данные реанализа, разработанные в National Centers for Environmental Prediction в США, были взяты с сайта Университета Восточной Англии (UEA CRU) (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep/>), поскольку для нас имели значение: 1) открытый доступ, 2) формат представления данных ASCII (UEA CRU), 3) осреднение по ячейкам (2,5x2,5 град) и (1,875x1,9 град) в аспекте крупномасштабных неоднородностей полей.

Данные состоят из двухмерного массива значений различных метеоэлементов в узлах географической сетки, (2,5°x2,5°), срочные данные для Н1000 гПа и суточные для температуры на АТ1000 гПа, за все дни зимы в период с 1981 по 2010 г.

Под повторяемостью центров циклонов по данным о геопотенциальной высоте АТ1000 гПа 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. Таким образом, подразумевается частота попадания центров циклонов в ромбовидную область 5x5°.

Повторяемость максимума величины горизонтального температурного градиента рассчитывается вдоль отрезка меридиана на изобарической поверхности АТ1000 гПа. В результате расчётов получается поле относительной частоты образования максимального горизонтального градиента температуры в данной ячейке 2,5 × 2,5 градусной сетки. Подробно методика определения повторяемости центров циклонов и величины горизонтального температурного градиента рассмотрена в работах (Михайлов и др., 2012)

Для оценки процента ледовитости Баренцева моря и прилегающих районов использовались данные национального центра снега и льда университета Колорадо (<http://nsidc.org/data/nsidc-0051.html>), полученные со спутников Nimbus-7, DMSP-F8,-F11, F13,-F17 с радиометрами SMMR, SSM / I-SSMIS. Данные имеют разрешение 25x25 км и были линейно экстраполированы в узлы регулярной сетки 1x1°.

Расчет градиента ледовитости производился по формуле:

$$Gt = \sqrt{Gx^2 + Gy^2} ;$$

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

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

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

Рассматриваемый нами промежуток времени (1981-2010 гг.) приходится на период потепления Арктики. Наша задача стоит в рассмотрении изменения сплоченности морского льда в зависимости от среднего климатического положения Арктического фронта. Поэтому для определения географического положения климатического Арктического фронта был взят период с 1981 по 2010 гг., который был разбит на два равных временных интервала по 15 лет: 1981–1995 и 1996–2010 гг. Данные сплоченности морского льда также были взяты за эти же интервалы.

Территория исследования охватывала акваторию Баренцева моря и прилегающие области (65–85° с.ш., 20–65° в.д.). Анализировался зимний период.

Результаты

В климатическом масштабе во всем районе Баренцева моря в зимнее время находится минимум поля приземного давления. В 1981-2010 гг. среднее барическое поле было ниже 1005 гПа. В период 1996-2010 гг. произошло углубление барической ложбины на 3 гПа в западной и центральной областях относительно 1981-1995 гг. (*рис. 1*). Таким образом, произошло усиление интенсивности циклонической деятельности в этом районе. При этом с 1981 по 2010 гг. прослеживаются разнонаправленные тенденции изменения циклонической активности в западном (20-40° в.д.) и восточном (40-60° в.д.) секторах Баренцева моря (*рис. 2*). Наблюдаются рост количества циклонов (25% за 30 лет), над свободной ото льда поверхностью в западной части Баренцева моря и уменьшение количества циклонов на 10% в восточной части. Усиление циркуляции и ее интенсивности над свободной ото льда поверхностью Баренцева моря при увеличении повторяемости западных составляющих ветра влечет за собой усиление адвекции тепла из Атлантики и ускорение дрейфового теплого атлантического течения, что приводит к притоку тёплых атлантических вод и дальнейшему понижению ледовитости в западной части Баренцева моря. Этот процесс нашел отражение в уменьшении ледовитости Баренцева моря в период 1979-2012 гг. с 55% до 30% со средней скоростью 7% за 10 лет.

Выявленный опережающий рост повторяемости центров циклонов в западных секторах Баренцева моря подтверждает модельные оценки экспериментов с МОЦА (Bengtsson et al., 2004), о повышении завихренности в атмосфере над свободной ото льда поверхностью Баренцева моря как основного звена положительной обратной связи между притоком теплых атлантических вод и ледовитостью Баренцева моря.

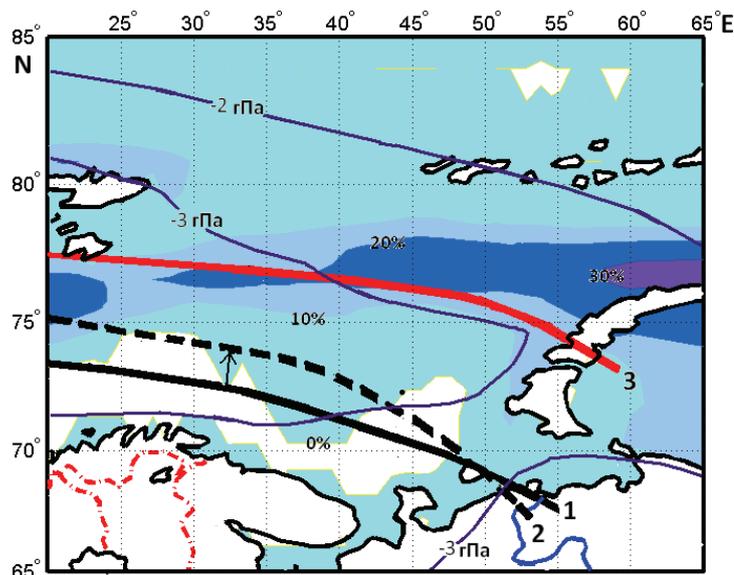


Рис. 1. Изменение ледовитости (%) Баренцева моря в зимний период (1996–2010 гг.) – (1981–1995 гг.) (цвет); изменение поля приземного давления (гПа) (изолинии) (1996–2010 гг.)–(1981–1995 гг.). Положение арктического фронта: линии максимального числа центров циклонов Н1000 гПа в 1981–1995 гг. (1), в 1986–2010 гг. (2), линия максимального градиента температуры АТ1000 гПа, 1981-2010 гг. (3)

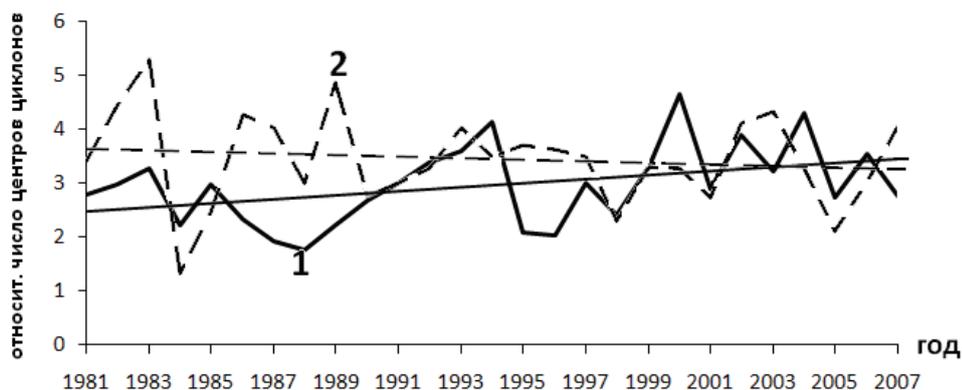


Рис. 2. Изменение относительного числа центров циклонов и их линейный тренд по годам в западной 20-40° в.д. (1) и восточной 40-60° в.д. (2) частях Баренцева моря в зимний период

На рис. 1 показано положение арктического фронта, выраженное линией максимальной повторяемости числа центров циклонов на Н1000 гПа за два анализируемых отрезка времени 1981–1995 и 1996–2010 гг., и положение линии максимального градиента температуры на АТ 1000 гПа в период 1981–2010 гг., на фоне изменения ледовитости Баренцева моря в период 1996–2010 гг. относительно 1981–1995 гг. Чаще всего циклоны проходят в южном секторе Баренцева моря и выходят на сушу в устье р. Печора. В период 1996–2010 гг. относительно периода 1981–1995 гг. наблюдалась тенденция смещения зоны наиболее частой повторяемости циклонов на арктическом фронте к северу на 2 широты. В западной час-

ти Баренцева моря с 73° с.ш. на 75° с.ш. (20° в.д.), а в центральной с 71° с.ш. на 73° с.ш. (40° в.д.), но этот сдвиг для среднего положения арктического фронта в климатическом масштабе находится в пределах среднеквадратического отклонения. В реальности, это смещение циклонических путей к северу выражается сотнями километров. В результате в южной части Баренцева моря вместе с потеплением произошло изменение ветрового режима, что сказалось в увеличении повторяемости ветров с СЗ, З и ЮЗ в ущерб повторяемости ветров с СВ, В и ЮВ направлений. Смещение к северу наиболее часто повторяющихся траекторий центров циклонов сопровождалось уменьшением ледовитости Баренцева моря в западных и центральных районах на 10% на градус широты за те же периоды (рис. 1).

Зона максимальных градиентов температуры арктического фронта прослеживается севернее среднего положения центров циклонов (рис. 1) на $4-6^{\circ}$ широты. Она спускается от 77° с.ш. в западной части Баренцева моря до 74° с.ш. в восточной, где выходит на Новую Землю. Нахождение максимальных градиентов температуры на АТ 1000 гПа именно в этих широтах было неизменно за весь климатический период. При этом на фоне стационарности температурных контрастов изменилась интенсивность величины градиентов температуры. Она уменьшилась на 2° за 30 лет, что составляет порядка 20% .

Быстрое увеличение ледовитости, практически от чистой воды до сплоченности льда $60-70\%$, наблюдается в районе прохождения Арктического фронта между зоной наиболее частого прохождения центров циклонов и полосой максимального градиента температуры. Причем наибольший градиент ледовитости максимально приближен к зоне максимальных градиентов температуры. Градиент ледовитости, как и температурный градиент, уменьшился на 2% за последние 30 лет и при этом сместился на 1° к северу с 77° с.ш. на 78° с.ш. (рис. 3).

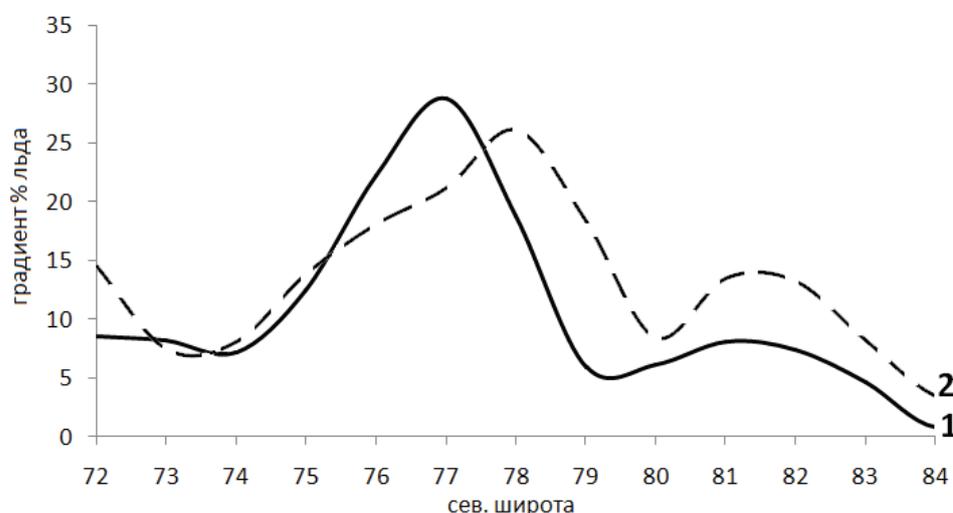


Рис. 3. Изменение градиента ледовитости Баренцева моря (%) в зависимости от широты в 1981-1995 гг. (1) и 1996-2010 гг. (2) в зимний период

В районе нахождения максимума температурного градиента ледовитость Баренцева моря зимой в среднем оценивается в 60-80%. Во второй период относительно первого во всей северной части Баренцева моря (севернее 75° с.ш.), севернее зоны максимальных градиентов температуры, произошло уменьшение количества льда от 10 до 30% (рис. 1). Наибольшие изменения за период 1981-2010 гг. произошли в северо-восточной части Баренцева моря, в прибрежных районах Новой Земли.

Заключение

На фоне значительного изменения ледовитости Баренцева моря положение Арктического фронта квазистационарно. На Арктическом фронте произошло углубление барической ложбины и усиление интенсивности циклонической деятельности над западными районами Баренцева моря. Это привело к смещению зоны наиболее частого прохождения циклонов на арктическом фронте к северу на 2 широты в западной части Баренцева моря, при неизменном выходе циклонов на сушу в районе устья р. Печора. Смещение траекторий циклонов к северу сопровождалось увеличением ветров с западной составляющей в северо-западном секторе Баренцева моря. Это усилило положительную обратную связь между притоком тёплых атлантических вод и, как следствие, уменьшением ледовитости Баренцева моря в этих районах.

Зона максимальных градиентов температуры арктического фронта стационарна и прослеживается севернее среднего положения центров циклонов. Нарастание количества льда в Баренцевом море лежит между зоной наиболее частого прохождения центров циклонов и полосой максимальных изменений температуры на арктическом фронте на АТ1000 гПа. Севернее зоны максимальных градиентов температуры за последние 30 лет произошло значимое уменьшение количества льда.

Наибольший градиент ледовитости максимально приближен к зоне максимальных градиентов температуры на АТ1000 гПа. Эти параметры изменяются синхронно. Снижение градиента ледовитости на 2% за последние 30 лет при смещении траекторий циклонов к северу сопровождается уменьшением температурного контраста на 2° за тот же период на фоне географической стационарности температурных градиентов.

Исследование выполнено при 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. проф. Г.В. Алексеева. СПб.: Гидрометеоздат. 2004. С. 27–46.
2. *Бузин И.И., Гудкович З.М.* Сезонные особенности климатических изменений в Баренцевом море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 3(89). С. 20–32.
3. *Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю.* Климатические вариации арктического фронта и ледовитости Баренцева моря зимой // Лед и снег. 2014. № 1. С. 85–90.
4. *Михайлов А.Ю., Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б.* Полярный фронт над равнинами России летом // Метеорология и гидрология. 2012. № 2. С. 24–29.
5. *Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е.*, Изменение морского ледяного покрова и других составляющих климатической системы в Арктике и Антарктике в связи с эволюцией полярных вихрей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1(78). С. 48–58.
6. *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.
7. *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.
8. *Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.П., Клячкин С.В., Фролов С.В.* Морской лед // Методы оценки последствий изменений климата для физических и биологических систем. М.: изд. Росгидромета, 2012. С. 400–429.
9. *Хромов С.П.* Географическое размещение климатологических фронтов // Изв. ВГО. 1950. Т. 82. Вып. 2. С. 126–137.
10. *Bengtsson, L., V. A. Semenov, and O. M. Johannessen.* The early-twentieth-century warming in the Arctic—A possible mechanism. // J. Climate, 2004, №17, P. 4045–4057.
11. *Schlichtholz, P.* Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas. // Geophys. Res. Lett., 2011:38, L05705, doi:10.1029/2010GL045894.
12. *Semenov, V.A. and M. Latif.* The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice. // The Cryosphere. 2012. 6, doi:10.5194/tc-6-1-2012.

Arctic Front and Barents Sea ice coverage in winter

T.B. Titkova, A.Y. Mikhailov, V.V. Vinogradova

Institute of Geography RAS, 119017 Moscow, Russia

E- mail: titkova@yandex.ru

In the work, changes in ice extent in the Barents Sea area are analyzed in connection with the location of the Arctic Front's main branch, that locates over Barents Sea and separates Arctic air mass from moderate sea air mass. The geographic location of the Arctic Front's main branch over the Barents Sea in winter periods of 1981- 2010 is defined more exactly.

The Arctic Front location is demonstrated to remain quasi-stationary against the background of significant changes in the Barents Sea ice coverage. Over the western part of the Barents Sea, the trough deepened and cyclonic activity became more intense. These trends caused a shift of the zone of most frequent cyclone passages in the Arctic front by 2° northward, leaving unaffected the cyclones surface entrance location near the Pechora River mouth. As a result, the positive feedback between warm Atlantic waters inflow and, consequently, Barents ice coverage decrease, became stronger. The zone of maximum temperature gradients in the Arctic Front is quasi-stationary and situated north to the cyclone centers' average position. The area of the Barents Sea ice mass increase is located between the zone of most frequent cyclone passages and the belt of the Arctic Front greatest temperature changes at AT1000 hPa. The ice cover gradient maximum is situated close to the zone of maximum temperature changes at AT1000 hPa; these two parameters change simultaneously. Ice cover gradient reduction (2% over the last 30 years), coupled with the northward shift of cyclone tracks, is accompanied by temperature contrasts reduction by 2°C over the same period against the background of geographic stationarity of temperature gradients.

Keywords: Arctic Front, Barents Sea ice coverage, surface air temperature gradient maximum, field of surface pressure, maximum repeatability of cyclone centers.

References

1. Alekseev G.V., *Formirovanie i dinamika sovremennogo klimata Arktiki* (Formation and dynamics of the modern Arctic climate), Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 2004, pp. 27–46.
2. Buzin I.I., Gudkovich Z.M. Sezonnye osobennosti klimaticeskikh izmenenij v Barencevom more (Seasonal patterns of climate change in the Barents Sea), *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2011, No. 3 (89), pp. 20–32.
3. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Mihajlov A.Ju. Klimaticheskie variacii arkticheskogo fronta i ledovitosti Barenceva morja zimoy (Climatic variations of the Arctic front and the Barents Sea ice cover in winter), *Led i sneg*, 2014, No. 1, pp. 85–90.
4. Mihajlov A.Yu., Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. Poljarnyj front nad ravninami Rossii letom (Polar front over the plains of Russia in summer), *Meteorologija i gidrologija*, 2012, No. 2, pp. 24–29.
5. Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smoljanickij V.M. Frolov I.E., Izmenenie morskogo ledjanogo pokrova i drugih sostavljajushhih klimaticheskoj sistemy v Arktike i Antarktike v svjazi s jevoljuciej poljarnyh vihrej (Changes in sea ice cover and other components of the climate system in the Arctic and Antarctic with the evolution of the polar vortex), *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2008, No. 1(78), pp. 48–58.
6. Semenov V.A., Mohov I.I., Latif M. Rol' granic morskogo l'da i temperatury poverhnosti okeana v izmenenijah regional'nogo klimata v Evrazii za poslednie desjatiletija (The role of sea ice boundaries and ocean surface temperature changes in regional climate in Eurasia over the past decade), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2012, Vol. 48, No. 4, pp. 403–421.
7. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smoljanickij V.M. Klimaticheskie izmenenija ledovyh uslovij v arkticheskikh morjah Evrazijskogo shel'fa (Climate change ice conditions in the Arctic seas of the Eurasian shelf), *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2007, No. 75, pp. 149–160.
8. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smoljanickij V.P., Kljachkin S.V., Frolov S.V. *Metody ocenki posledstvij izmenenij klimata dlja fizicheskikh i biologicheskikh system* (Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems), Moscow: Izd-vo Rosgidrometa, 2012, pp. 400–429.
9. Hromov S.P. *Geograficheskoe razmeshhenie klimatologicheskikh frontov* (Geographic location of climatological fronts), *Izv-vo: VGO*, 1950, Vol. 82, Issue. 2, pp. 126–137.
10. Bengtsson, L., V. A. Semenov, and O. M. Johannessen.: The early-twentieth-century warming in the Arctic, A possible mechanism, *J. Climate*, 2004, No. 17, pp. 4045–4057.
11. Schlichtholz, P. Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas, *Geophys. Res. Lett.*, 2011:38, L05705, doi:10.1029/2010GL045894.
12. Semenov, V.A. and M. Latif. The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice, *The Cryosphere*, 2012, 6, doi:10.5194/tc-6-1-2012.