

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 551.515.(8) (589.1)

doi:10.15356/2076-6734-2016-4-493-501

Положения арктического фронта в периоды похолодания и потепления Арктики

© 2016 г. А.Ю. Михайлов, А.Н. Золотокрылин*, Т.Б. Титкова

Институт географии РАН, Москва, Россия

*azolotokrylin1938@yandex.ru

Winter positions of Arctic front during periods of cooling and warming

A.Yu. Mikhailov, A.N. Zolotokrylin*, T.B. Titkova

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*azolotokrylin1938@yandex.ru

Received March 1, 2016

Accepted May 24, 2016

Keywords: *air masses, air temperature, Arctic Front, sea ice concentration, sea surface temperature, surface pressure, wind divergence.*

Summary

Winter positions of the Arctic front (AF) during the known periods of the climate cooling (1949–1980) and warming (1981–2012) were analyzed within the sector 10° W – 60° E. The AF positions were determined by the following indicators: 1) a surface pressure; 2) horizontal wind divergence; 3) geostrophic vortex; 4) geostrophic heat advection. The main extrema of these four dynamic characteristics coincide and fall on the latitude 72.5° N. This corresponds to the average position of the AF for a given resolution and confirms correctness of our choice of these characteristics as the AF indicators. Relative differences between mean profiles of all values of the above warm and cold periods were calculated using method of normalization of each value for the corresponding latitude by the standard deviation for the entire period (1949–2012). To study variability of the AF position we used mean yearly winter profiles of the variables under investigation together with the statistical analysis of positions of the extrema within the latitude degrees. For pressure and geostrophic advection positions of the absolute minima were determined while for geostrophic vortex and divergence – positions of the absolute maxima.

The data show that according to different criteria the AF average positions for the period 1949–2012 lie within the zone 72.4–73.4 N. The interannual variability of the AF positions lies within the 1–2 degrees of latitude and corresponds to the range of the air temperature variability above the zone of maximal changes in the sea ice area. According to the standard deviation values of the divergence and the geostrophic vortex are the most stable in region of the AF passage. Comparison of differences of the studied characteristics between the warm and cold periods shows that the changes in the AF positions are not statistically significant ($P(t) < 91\%$ t-criterion) unlike the changes in positions of isolines which characterize the warming ($P(t) = 100\%$). Thus, despite significant changes in properties of the surface and the temperature regime to the north of 72.5 N (the warming), according to all the criteria the AF climatic position remains quasi-stationary for 32-year periods of averaging.

Поступила 1 марта 2016 г.

Принята к печати 24 мая 2016 г.

Ключевые слова: *арктический фронт, воздушные массы, дивергенция ветра, концентрация морского льда, приземное давление, температура воздуха, температура поверхности океана.*

Исследовано зимнее положение арктического фронта в секторе 10° з.д. – 60° в.д. в периоды похолодания (1949–1980 гг.) и потепления (1981–2012 гг.) Арктики. Положение арктического фронта определялось по положению минимума давления и геострофической адвекции, максимумам геострофического вихря и дивергенции ветра. Установлено, что разности в положении арктического фронта для периода потепления и похолодания статистически незначимы для всех перечисленных параметров и положение арктического фронта можно считать квазистационарным при значительном потеплении на 3–6 °C за 32 года.

Введение

Современное потепление Арктики и сокращение площади арктического льда в последние декады целесообразно рассмотреть с точки зре-

ния климатологии воздушных масс, используя понятие климатического фронта. В зимний период расположенная между долготами 10° з.д. и 60° в.д. Атлантико-Европейская ветвь арктического фронта (АФ) развивается между холодной

арктической и переходной субарктической массами [1–3]. Норвежская школа синоптического анализа, а позднее и советская считали положение АФ квазистационарным [1, 3]. Вопрос о том, как изменения климата и ледовитости Арктики влияют на положение АФ, изучен слабо.

В связи с современным потеплением Арктики этому вопросу посвящено несколько публикаций [4–10]. В работе [4] показано, что в зимний период максимальная амплитуда колебаний атлантической ветви АФ составляла $3\text{--}3,5^\circ$ по долготе: АФ занимал крайнее северное положение в периоды потепления Арктики 1920–40-х и 1980–2010-х годов и южное – в период похолодания 1950–70-х годов. Отметим, что колебания Атлантико-Европейской ветви АФ на широтах $10\text{--}50^\circ$ з.д., приведённые в работе [4], авторы не рассматривали. Данная ветвь имеет двойственную структуру и состоит из главной ветви над океаном и вторичной над Северной Европой [5]. В этой же статье авторы визуально сравнили положение АФ на картах в периоды 1948–1980 и 1981–2010 гг. с известным его положением в период потепления 1930–40-х годов из работы [1] и отмечают незначительное изменение положения АФ в обозначенные периоды. Указанное сравнение не подтверждено количественными оценками, что снизило достоверность этого заключения.

В данной работе исследованы межгодовые вариации главной Атлантико-Европейской ветви АФ зимой в периоды похолодания и потепления Арктики с целью оценки влияния потепления на положение АФ.

Данные и методика исследований

Для исследования вариаций положения АФ в условиях «холодного» (1949–1980 гг.) и «тёплого» (1981–2012 гг.) периодов в Атлантико-Европейском секторе, ограниченном 10° з.д. – 60° в.д. и $50\text{--}90^\circ$ с.ш., были рассчитаны меридиональные профили среднеширотных циркуляционных, термических и океанологических величин, полученных по данным реанализа (NCEP/NCAR) путём осреднения срочных данных за указанные два периода. Выбор дат холодного и тёплого периодов основывался на знаках аномалий температуры воздуха th , приведённых на рис. 1, и соображения равенства статистических выборок.

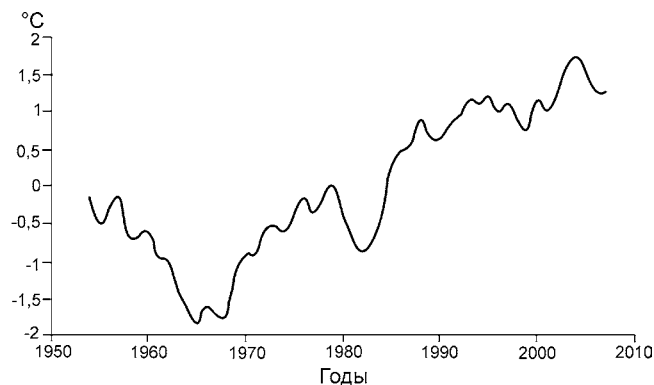


Рис. 1. Нормированные на стандартное отклонение (СТО) аномалии десятилетних скользящих средних зимних температур th , осреднённых по сектору 10° з.д. – 60° в.д. и $50^\circ\text{--}90^\circ$ с.ш. (средняя $th = -8,0^\circ\text{C}$, СТО = 1°C)

Fig. 1. The normalized by the standard deviation (SR) anomaly of 10-year moving average winter temperature th , sector 10° W – 60° E and $50^\circ\text{--}90^\circ$ N (average $th = -8,0^\circ\text{C}$, standard deviation 1°C)

Данные о ветре, температуре и геопотенциале получены из архива <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncsr/> по срочным данным (четыре срока в сутки) для сетки $2,5 \times 2,5^\circ$ за период 1949–2012 гг. В работе использовались данные о ветре и температуре воздуха для уровня $\sigma = 0,995$ (примерно 40 м над земной поверхностью). Месячные данные о температуре поверхности океана sst для сетки ($2 \times 2^\circ$) взяты из архива <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/NOAA/NCDC/ERSST/.version3b/.sst/>. Сведения о концентрации льда ice – из архива <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.surfaceflux.html>.

Для оценки положения АФ выбраны следующие величины: 1) приземное давление ps ; 2) дивергенция горизонтального ветра div (АФ проходит по линии минимального среднего давления и максимальной конвергенции) [1, 11]; 3) максимум геострофического вихря $grot$ (положителен при вращении против часовой стрелки), определяющий преобладание циклонических форм барической топографии (периферии циклонов, ложбины); 4) минимум геострофической адвекции тепла $gadt$ (максимум адвекции холода над относительно тёплым океаном) как зоны активного действия синоптических фронтов; 5) зональная U и меридиональная V составляющие приземного ветра, смена знака которых

может указывать на положение АФ. Использование геострофической адвекции тепла вместо обычной адвекции обусловлено необходимостью оценки деятельности синоптических фронтов, в то время как максимумы обычной адвекции тепла привязаны к зонам контрастов подстилающей поверхности (морской лёд – открытая вода, океан – суша).

Рассмотрим методы расчёта указанных величин.

1. В качестве приземного давления ps (гПа) использовалось приведённое давление по геопотенциалу на АТ1000 с учётом фактической температуры воздуха (в работе использовалась величина $P = ps - 1000$).

2. Величина дивергенции горизонтального ветра div (1/сут.) рассчитывалась в сферической системе координат по данным о ветре для сигма-поверхности 0,995 (40 м над земной поверхностью) по формуле

$$div = -\frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial(V \cos \varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial U}{\partial \lambda} \right], \quad (1)$$

где φ и λ – соответственно широта и долгота; U и V – соответственно зональная и меридиональная составляющие скорости ветра на высоте 40 м; R – радиус Земли.

В расчётах использовался конечно-разностный аналог формулы (1) для четырёх точек в углах ячейки $2,5 \times 2,5^\circ$ (здесь конвергенция берётся со знаком плюс).

3. Величина геострофического вихря $grot$ (1/сут.) рассчитывалась по данным о геопотенциале H (м) на АТ1000 по формуле

$$grot = \frac{g}{l} \Delta H,$$

где Δ – оператор Лапласа в сферической системе координат; l – параметр Кориолиса; $g = 9,8$.

4. Величина геострофической адвекции тепла $gadt$ ($^\circ\text{C}/\text{сут.}$) рассчитывалась по данным о геопотенциале H и температуре T на АТ1000 по формуле

$$gadt = \frac{g}{lR \cos \varphi} \left(\overline{\frac{\partial H}{\partial \varphi} \frac{\partial T}{\partial \lambda} - \frac{\partial H}{\partial \lambda} \frac{\partial T}{\partial \varphi}} \right),$$

где черта сверху означает осреднение по метеорологическим срокам за весь интересующий период. В расчётах использовался конечно-разностный аналог данной формулы для четырёх точек в углах ячейки $2,5 \times 2,5^\circ$.

Анализ результатов

На первом этапе исследования положения АФ рассчитаны средние за исследуемый период меридиональные профили всех рассматриваемых величин (табл. 1). Здесь же представлены разности меридиональных профилей характеристик потепления – температуры воздуха, температуры поверхности океана; концентрация морского льда – между тёплым (1981–2012 гг.) и холодным (1949–1980 гг.) периодами. Из табл. 1 видно, что для четырёх приведённых динамических характеристик их главные экстремумы совпадают и приходятся на широту $72,5^\circ$ с.ш., что соответствует среднему положению АФ для данного разрешения и подтверждает обоснованность выбора данных характеристик в качестве индикаторов фронта. На этой же широте наблюдается смена направления зональной составляющей ветра с западного на восточный и меридиональной составляющей ветра – с южного на северный. Отметим, что арктический фронт располагается на $5–10^\circ$ южнее зоны максимального потепления ($77,5–82^\circ$ с.ш.), связанного, по-видимому, с существенным сокращением площади морских льдов на этих широтах.

На втором этапе исследования рассчитаны относительные разности δ средних профилей всех величин между тёплым и холодным периодами путём нормирования каждой величины на стандартное отклонение (СТО) за весь период (1949–2012 гг.) для соответствующей широты. Для оценки значимости разностей выполнена оценка вероятности $P(t)$ по t -распределению Стьюдента, которая при $|\delta| > 50\%$ принимает значения $P \geq 95\%$, а при $|\delta| > 40\%$ – $P \geq 90\%$. Значимой разность считается при $|\delta| \geq 50\%$, а близкой к значимой – при $|\delta| \geq 40\%$. Результаты расчётов приведены на рис. 2 и 3.

Анализ рис. 2 показывает, что на широте АФ ($72,5^\circ$ с.ш.) наблюдаются значимый рост температуры воздуха и поверхности океана и уменьшение концентрации льда (на этой широте $ice = 0,2$). Потепление в районе АФ сопровождается увеличением южной составляющей ветра и уменьшением северной составляющей над районом $70–77,5^\circ$ с.ш. Профиль концентрации морского льда ice указывает на значимое сокращение площади морских льдов к северу от $72,5^\circ$ с.ш., особенно на широтах $77,5–82,5^\circ$ с.ш.,

Таблица 1. Меридиональные профили величин в диапазоне от 10° з.д. – 60° в.д., осреднённые за период 1949–2012 гг., и разности между тёплым (1981–2012 гг.) и холодным (1949–1980 гг.) периодами*

Градус широты	Величины, определяющие положение арктического фронта за 1949–2012 гг.						Разности между тёплым и холодным периодами		
	<i>U</i> , м/с	<i>V</i> , м/с	<i>div</i> , 1/сут	<i>P</i> , гПа	<i>grot</i> , 1/сут	<i>gadt</i> , °C/сут	Δth , °C	Δsst , °C	Δice , %
87,5	-1,92	-0,12	-0,11	12,3	0,44	3,59	2,73	0,00	0
85	-1,47	-0,83	0,14	11,2	0,38	3,49	2,92	0,00	0
82,5	-0,96	-0,75	0,11	10,3	0,05	2,69	4,42	0,01	-2
80	-1,42	-1,29	0,04	8,9	-0,01	0,69	6,05	0,34	-11
77,5	-1,54	-1,25	0,13	7,0	0,50	-1,50	5,12	0,27	-16
75	-1,46	-0,76	0,26	5,3	1,14	-2,77	2,97	0,28	-9
72,5	-0,18	0,22	0,40	4,8	1,30	-3,09	1,70	0,20	-4
70	1,48	1,67	0,26	5,7	0,87	-1,93	0,81	0,15	-1
67,5	1,39	1,86	0,05	7,5	0,30	0,64	0,58	0,25	1
65	1,16	1,85	0,05	9,4	-0,03	2,50	0,80	0,23	-2
62,5	1,29	1,95	0,05	11,3	-0,06	2,56	0,80	0,18	1
60	1,14	1,87	0,06	12,9	0,06	1,84	0,96	0,16	1
57,5	1,30	1,93	0,10	14,6	0,13	1,38	1,19	0,18	1
55	1,50	2,03	0,03	16,5	0,02	1,58	1,28	0,17	0
52,5	1,19	1,75	-0,05	18,3	-0,27	2,01	1,23	0,18	0

*Жирным шрифтом выделены цифры, соответствующие среднему положению АФ. Δth – разность температуры воздуха; Δsst – разность температуры поверхности океана; Δice – разность концентрации льда.

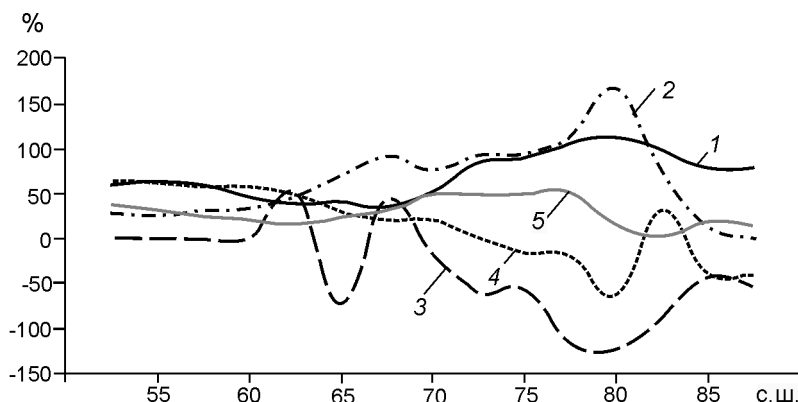


Рис. 2. Разность зимних зональных средних величин на интервале долгот (10° з.д. – 60° в.д.) между тёплым (1981–2012 гг.) и холодным (1949–1980 гг.) периодами осреднения, нормированная на соответствующее межгодовое стандартное отклонение (СТО за весь период) для каждой широты при относительной разности 50% и более по модулю (разность значима по Стьюденту с вероятностью более 95%):

1 – *th* – температура воздуха; 2 – *sst* – температура поверхности океана; 3 – *ice* – концентрация льда; 4 – *U* – северная составляющая ветра; 5 – *V* – южная составляющая ветра

Fig. 2. The difference between winter zonal mean values in the range of longitude (10° W – 60° E) between warm (1981–2012) and cold (1949–1980) averaging period, normalized to the corresponding interannual standard deviation for each latitude. When the relative difference of 50% or more in absolute value (the difference is significant by Student's probability of more than 95%):

1 – *th* – temperature air; 2 – *sst* – temperature sea surface; 3 – *ice* – concentration of ice; 4 – *U* – northern wind component; 5 – *V* – south wind component

что обусловлено ростом температуры воздуха на 4–6 °C ($\delta > 100\%$) и поверхности океана *sst* на 0,3 °C ($\delta > 100\%$). Значимое повышение температуры океана к югу от 72,5° с.ш. не связано с сокращением площади льда ввиду его низкой концентрации (*ice* < 0,2), а, скорее, есть следствие

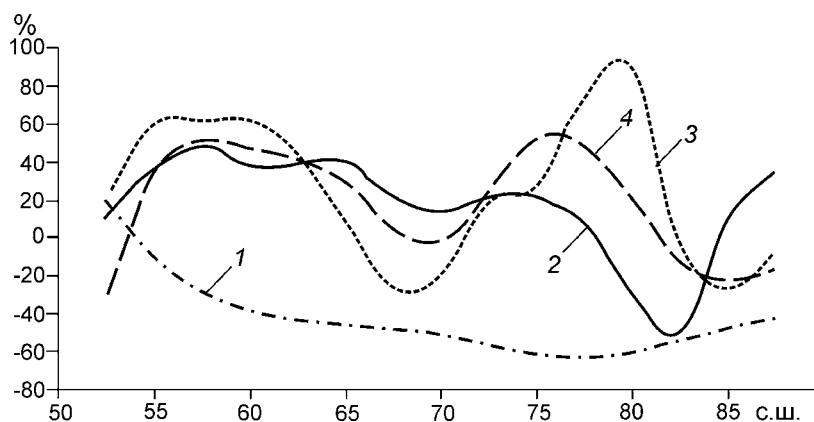


Рис. 3. Разность зимних зональных средних величин на интервале долгот (10° з.д. – 60° в.д.) между тёплым (1981–2012 гг.) и холодным (1949–1980 гг.) периодами осреднения, нормированная на соответствующее межгодовое стандартное отклонение (СТО за весь период) для каждой широты:

1 – P – приземное давление; 2 – $gadt$ – адвекция тепла; 3 – div – дивергенция; 4 – $grot$ – геострофический вихрь

Fig. 3. The difference between winter zonal mean values in the range of longitude (10° W – 60° E) between warm (1981–2012) and cold (1949–1980) averaging period, normalized to the corresponding interannual standard deviation for each latitude:

1 – P – surface pressure; 2 – $gadt$ – heat advection; 3 – div – convergence; 4 – $grot$ – cyclonic vortex

изменений в свойствах океанических течений (Гольфстрим). Повышение температуры воздуха к югу от широты АФ носит фоновый характер общего повышения зимней температуры над умеренными широтами Северного полушария, не связанный с изменениями на поверхности океана (доля океана к югу от 70° с.ш. составляет менее 35%). Отметим два максимума роста концентрации льда: на $67,5^\circ$ и $62,5^\circ$ с.ш. Первый связан с увеличением площади льда на юго-восточной периферии Баренцева моря, второй – с ростом ледовитости Балтийского моря. Значимый минимум на широте 65° с.ш. связан с сокращением площади льдов на Белом море.

На рис. 3 представлены относительные разности величин, определяющих положение АФ. Согласно этим данным, наблюдается значимое падение приземного давления на всём интервале широт от 65° до 85° с.ш. Другие характеристики изменяются только в отдельных точках. Например, увеличение циклонического вихря вблизи АФ (на 75° с.ш.) позволяет предположить смещение зоны максимальной циклонической активности к северу. Резкий рост конвергенции на широте 80° с.ш. и уменьшение адвекции тепла на широте $82,5^\circ$ с.ш. отражает смещение к северу зоны сплошных льдов и снижение концентрации льда в зоне несплошных льдов (75 – 80° с.ш.), что проявляется в противоположных по знаку

сильных изменениях восточного переноса на широтах 80 – $82,5^\circ$ с.ш. (см. рис. 2).

На профилях геострофического вихря $grot$, геострофической адвекции тепла $gadt$ и дивергенции горизонтального ветра div (см. рис. 3) на широте $57,5^\circ$ с.ш. наблюдаются положительные значения δ , которые являются значимыми. Эти изменения относятся ко вторичной ветви АФ, простирающейся вдоль данной широты от Северного моря через юг Балтики, Финский залив до 50° в.д. [5]. Причина возникновения этой ветви – локальный минимум температуры воздуха над Скандинавией и севером ЕТР, который проявляется в регенерации циклонов над Балтикой (над Скандинавией циклоны разрушаются). Таким образом, эта вторичная ветвь АФ «разделяет» более холодный субарктический воздух над Северной Европой и тёплый полярный воздух, проникающий из Атлантики через Балтику до 50° в.д. На широте $57,5^\circ$ с.ш. прослеживаются локальные максимумы геострофического вихря $grot$ и дивергенции горизонтального ветра div (см. табл. 1). На широте основной ветви АФ ($72,5^\circ$ с.ш.) изменения перечисленных величин незначимы.

Для более точного исследования изменчивости положения АФ мы использовали ежегодные зимние профили всех исследуемых величин с дальнейшим статистическим анализом положения экстремумов этих величин в градусах ши-

Таблица 2. Статистика колебаний широты характеристик положения арктического фронта*

Характеристики положения АФ	Тренд и его оценки в период 1949–2012 гг.			Стандартное отклонение, градус широты		Средняя, градус широты		Разность средних между периодами, градус широты	Стандартное отклонение Δ , %	$P(t)$, %
	градус/год	$P(F)$, %	R , %	П1	П2	П1	П2			
latmin_ps	0,019	87	0,19	1,83	1,98	72,50	73,12	0,61	32	80
latmax_grot	0,018	99	0,30	0,98	1,15	72,98	73,43	0,45	42	91
latmin_adv	-0,014	75	0,15	2,01	1,53	73,39	73,10	-0,29	-16	48
latmax_div	0,017	97	0,27	0,82	1,41	72,41	72,85	0,44	38	87
$U = 0$	0,019	63	0,11	3,34	2,88	71,92	72,33	0,41	13	40
$V = 0$	0,051	94	0,23	3,33	4,55	72,86	74,58	1,72	42	91
sst = 1	0,012	100	0,52	0,30	0,41	74,32	74,73	0,41	101	100
ice = 0,2	0,041	100	0,43	1,81	1,32	73,54	75,33	1,79	99	100
ice = 0,95	0,035	100	0,74	0,24	0,80	80,43	81,72	1,29	147	100
th = -10	0,046	100	0,53	1,08	1,73	74,76	76,34	1,58	97	100

*П1 и П2 – периоды 1949–1980 и 1981–2012 гг. соответственно; $P(F)$ – вероятность наличия тренда (значимость) по F -распределению; $P(t)$ – вероятность (значимость) разности между двумя выборками по t -распределению Стьюдента; R – коэффициент корреляции между линией тренда и данными выборки.

роты. Для определения широты положения АФ проводилась квадратичная интерполяция вблизи точки абсолютного экстремума, кратной 2,5, для каждого из четырёх индикаторов АФ. Для давления и геострофической адвекции определены положение абсолютных минимумов приземного давления **latmin_ps** и дивергенция горизонтального ветра **latmin_adv**, а для геострофического вихря и дивергенции – положение абсолютных максимумов **latmax_grot** и **latmax_div**. Была также сделана попытка исследования изменений положения АФ по нулевым изолиниям горизонтальных составляющих скорости ветра ($U = 0$ и $V = 0$) путём линейной интерполяции между точками, кратными 2,5°.

Для исследования связей изменения положения АФ и характеристик потепления (температуры воздуха **th**, температуры поверхности океана **sst** и концентрации льда **ice**) выполнены аналогичные статистические оценки межгодовых рядов среднего положения изолиний в их меридиональных профилях. Для температуры поверхности океана было выбрано значение +1 °C (**sst = 1**), что обусловлено высоким межгодовым стандартным отклонением и низкой концентрацией льда (менее 0,3). Для концентрации льда исследованы положения изолинии 0,95 (**ice = 0,95**), означающей границу сплошного льда, и изолинии 0,2 (**ice = 0,2**) – минимальной в секторе с долей океана более 90%. Выбор изолинии температуры воздуха **th = -10 °C** обусловлен максимальной по профилю межгодо-

вой изменчивостью (стандартного отклонения), близостью к зоне максимального сокращения площади морских льдов и максимальной корреляцией положения этой изолинии со средней для всей исследуемой области величиной температуры воздуха **th** (корреляция равна 0,91). Точное положение этих изолиний также определялось путём линейной интерполяции между двумя точками на профиле. Результаты статистического анализа рассмотренных характеристик приведены в табл. 2.

Анализ данных стандартного отклонения показывает, что положение изолиний зональной U и меридиональной V составляющих приземного ветра ($U = 0$ и $V = 0$) имеет очень высокую межгодовую изменчивость (до 4°), при этом примерно в 20% случаев переход через ноль для U и V отсутствует. По этой причине положение изолиний ($U = 0$ и $V = 0$) не может служить надёжным критерием ежегодного положения АФ. Данные табл. 2 показывают, что среднее положение АФ за последние 64 года, согласно разным критериям, лежит в пределах 72,4–73,4° с.ш. Эти результаты не противоречат приведённым ранее данным (см. табл. 1). Межгодовая изменчивость положения АФ лежит в пределах 1–2° широты и соответствует масштабу изменчивости температуры воздуха над зоной максимальных изменений площади морского льда. При этом по критериям дивергенции и геострофического вихря положение фронта – наиболее стабильное с точки зрения стандартного отклонения.

Таблица 3. Корреляционная матрица широт исследуемых характеристик за 1949–2012 гг.*

Показатели	latmin_ps	latmax_grot	latmin_adv	latmax_div	U = 0	V = 0	sst = 1	ice < 0,2	ice > 0,95	th = -10
latmin_ps	1,00	0,77	-0,13	0,23	0,83	0,62	0,29	0,23	0,21	0,43
latmax_grot		1,00	-0,28	0,52	0,62	0,68	0,44	0,31	0,40	0,60
latmin_adv			1,00	-0,46	0,03	-0,52	0,00	0,03	-0,26	-0,34
latmax_div				1,00	0,05	0,52	0,53	0,46	0,41	0,67
U = 0					1,00	0,36	0,16	0,10	0,04	0,17
V = 0						1,00	0,36	0,34	0,43	0,66
sst = 1							1,00	0,85	0,56	0,79
ice < 0,2								1,00	0,58	0,78
ice > 0,95									1,00	0,66
th = -10										1,00

*Обозначения см. текст; 5%-му уровню значимости соответствует величина 0,26.

Сравнение разностей между тёплым и холодным периодами показывает, что, согласно *t*-критерию, изменения положения АФ статистически не значимы ($P(t) < 91\%$) в отличие от положения изолиний, характеризующих потепление ($P(t) = 100\%$). Таким образом, несмотря на значительные изменения свойств поверхности и температурного режима к северу от 72,5° с.ш. (потепление), климатическое положение АФ по всем критериям остаётся стационарным для 32-летних периодов осреднения.

Данные о 64 годовых трендах указывают на тенденцию смещения АФ к северу (кроме критерия минимума адвекции тепла). При этом к значимым относятся тренды для положения максимумов геострофического вихря и дивергенции, которые составляют 1° за 64 года. Эта величина значительно меньше температурного тренда, равного смещению к северу изолинии ($th = -10$) на 3° за 64 года. Для анализа факторов, определяющих изменение положения АФ, была рассчитана корреляционная матрица для всех исследуемых величин (табл. 3). Анализ данных этой таблицы позволяет сделать ряд выводов.

1. Все коэффициенты корреляции положительны за исключением адвекции тепла. Это показывает, что зимнее потепление, сопровождающееся смещением к северу изолиний температуры воздуха, поверхности океана и морского льда, вызывает аналогичное смещение к северу АФ по всем критериям (кроме адвекции тепла), включая границу области южных и западных ветров.

2. Смещение к югу минимума геострофической адвекции тепла, по нашему мнению, обус-

ловлено тем, что потепление вызывает значительное (на 1,6° за 32 года) расширение к северу области южных ветров. Поскольку область адвекции холода формируется под влиянием как южных, так и северных ветров, сокращение зоны преобладающих северных ветров над Баренцевым морем означает смещение максимума адвекции холода в сторону южных ветров (в сторону границы холодная суша – тёплый океан).

3. Положительные аномалии температуры воздуха и открытой поверхности океана приводят к северному смещению линии максимального геострофического вихря и дивергенции (корреляция 0,6 и 0,67 соответственно), что означает аналогичные аномалии в положении максимума циклонической деятельности и минимума давления.

Обсуждение результатов

Сокращение площади морских льдов, приводящее к значительному локальному потеплению воздуха (5–6 °С за 32 года на широтах 77,5–82,5° с.ш.), вызывает небольшую перестройку циркуляции, проявляющуюся в смещении к северу (на 0,57° широты за 32 года) линий максимальной конвергенции и геострофического вихря. Это, в свою очередь, приводит к аналогичному смещению минимума давления (на 0,61° широты за 32 года). Таким образом, устанавливаются две противоположные тенденции, определяющие положение АФ: первая – потепление над границей льдов и открытым океаном переносит АФ к северу; вторая – постоянство границы «суша и открытый океан» и слабое

изменение температуры поверхности открытой воды (смещение к северу изолинии температуры поверхности океана $sst = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет всего $0,37^{\circ}$ широты за 32 года) тормозит смещение на север АФ и делает его стационарным в масштабе 32-летнего осреднения.

Гипотетически можно предположить, что, если положение АФ нестационарно и условия атмосферной циркуляции меняются (смещение к северу максимума геострофического вихря, его значимое увеличение на широтах $75\text{--}77,5^{\circ}$ с.ш. и соответствующий рост циклонической деятельности), это может вызвать потепление воздуха и соответственно увеличение площади свободного ото льда океана. В случае стационарного положения АФ объяснение потепления неменяющимися условиями атмосферной циркуляции отпадает и следует привлекать данные о притоке океанического тепла в арктический бассейн [12].

В пользу квазистационарности АФ свидетельствуют исследование положения АФ и изменение его характеристик в периоды 1981–2000, 2011–2030 и 2041–2060 гг. на территории России в зимний и летний сезоны по результатам численного эксперимента на региональной климатической модели (РКМ) ГГО [10]. Показано, что на фоне продолжающегося и прогнозируемого потепления на севере России положение ветвей АФ было квазистационарным по данным наблюдений во второй половине XX – начале XXI в., а также по результатам численного эксперимента в период 1981–2000 гг. и, вероятно, останется таковым вплоть до 2060 г. (согласно данным РКМ ГГО).

Литература

1. Хромов С.П. Географическое размещение климатологических фронтов // Изв. ВГО. 1950. № 2. С. 126–137.
2. Bergeron T. Über die dreidimensional verknüpfende Wetteranalyse. Pt. 1: Prinzipielle Einführung in das Problem der Luftmassen-und Frontenbildung. Geofys. Publ. (Oslo), 1928. № 5. P. 1–111.
3. Bergeron T. Richtlinien einer dynamischen Klimatologie // Meteorologische Zeitschrift. 1930. № 47. P. 246–262.
4. Веретененко С.В., Дергачев В.А., Дмитриев П.Б. Влияние солнечной активности и вариаций космических лучей на положение арктического фронта в Северной Атлантике // Изв. РАН. Сер. физическая. 2007. Т. 71. № 7. С. 1041–1043.

Заключение

По данным реанализа NCEP/NCAR рассмотрены изменения между периодом потепления (1981–2012 гг.) и похолодания (1949–1980 гг.) главной Атлантико-Европейской ветви арктического фронта зимой над атлантической Арктикой. Местонахождение АФ определялось по положению минимума давления и геострофической адвекции, максимумов геострофического вихря и дивергенции ветра. Установлено, что разности в положении АФ для периода потепления и похолодания статистически незначимы для всех перечисленных параметров, а положение АФ можно считать стационарным при значительном (на $3\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 32 года) потеплении. При анализе линейных трендов оказалось, что АФ статистически значимо смещается к северу – на $0,58^{\circ}$ за 32 года – по максимуму геострофического вихря и дивергенции. Это соответствует смещению к северу на $1,3\text{--}1,5^{\circ}$ изотерм приземного воздуха и границы сплошных льдов. Таким образом, сокращение площади морских льдов приводит через температуру воздуха к незначительному смещению АФ к северу. Положение АФ в условиях потепления и похолодания Арктики можно считать квазистационарным.

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

Acknowledgments. This work was funded by the Russian Foundation of Basic Research (grant 13-05-00031).

References

1. Khromov S.P. Geographical position of climatological fronts. *Izvestiya VGO*. Proc. of All-Union Geographical Society. 1950, 2: 126–137. [In Russian].
2. Bergeron T. Über die dreidimensional verknüpfende Wetteranalyse, Pt. 1: Prinzipielle Einführung in das Problem der Luftmassen-und Frontenbildung. Geofys. Publ. (Oslo). 1928, 5: 1–111.
3. Bergeron T. Richtlinien einer dynamischen Klimatologie. *Meteorologische Zeitschrift*. 1930, 47: 246–262.
4. Veretenenko S.V., Dergachev V.A., Dmitriev P.B. Influence of solar activity and variations of cosmic rays to the position of Arctic front in the North Atlantic. *Izvestiya Ross. Akad. Nauk. Seriya Fizicheskaya*. Proc. of the RAS, Physical Series. 2007, 71 (7): 1041–1043. [In Russian].

5. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю. Климатические вариации арктического фронта и ледовитости Баренцева моря зимой // Лёд и Снег. 2014. № 1 (125). С. 80–85.
6. Золотокрылин А.Н., Михайлов А.Ю., Титкова Т.Б. Влияние притоков теплых атлантических вод на аномалии климата в атлантическом секторе Арктики. // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 3. С. 73–82. doi: 10.15356/2076-6734-2015-3-73-82
7. Михайлов А.Ю., Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Полярный фронт над равнинами России летом // Метеорология и гидрология. 2012. № 2. С. 24–29.
8. Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю., Виноградова В.В. Арктический фронт и ледовитость Баренцева моря в зимний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 117–125.
9. Титкова Т.Б., Виноградова В.В., Михайлов А.Ю. Климатические вариации арктического фронта в теплый период и их проявления в северных ландшафтах // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 4. С. 39–46.
10. Черенкова Е.А., Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю. Сезонные особенности Арктического фронта на территории России в XX и XXI веках // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 4. С. 78–85.
11. Хромов С.П. Новые карты главных фронтальных зон // Метеорология и гидрология. 1940. № 8. С. 85–101.
12. Семенов В.А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // ДАН. 2008. Т. 418. № 1. С. 106–109.
5. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Mihajlov A. Yu. Climatic variations of the Arctic front and ice coverage in the Barents Sea in winter. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 1 (125): 80–85. [In Russian].
6. Zolotokrylin A.N., Mikhailov A. Yu., Titkova T.B. Influence of income of warm Atlantic waters to the climate anomalies in the Atlantic sector of Arctic. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (3): 73–82. doi:10.15356/2076-6734-2015-3-73-82 [In Russian].
7. Mikhailov A. Yu., Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. Polar front above the Russian plains by summer. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2012, 2: 24–29. [In Russian].
8. Titkova T.B., Mikhailov A. Yu., Vinogradova V.V. Arctic front and sea coverage of Barents Sea in winter. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014, 11 (3): 117–125. [In Russian].
9. Titkova T.B., Vinogradova V.V., Mikhailov A. Yu. Climatic variations of Arctic front in the warm period and their reflections in north landscapes. *Izvestiya Ross. Akad. Nauk, Seriya Geogr.* Proc. of the RAS, Geographical Series. 2015, 4: 39–46. [In Russian].
10. Cherenkova E.A., Titkova T.B., Mikhailov A. Yu. Seasonal peculiarities of Arctic front at the Russian territory in 20th and 21st centuries. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2014, 18 (4): 78–85. [In Russian].
11. Khromov S.P. New maps of main frontal zones. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1940, 8: 85–101. [In Russian].
12. Semenov V.A. Influence of oceanic income to the Barents Sea to the climate variability in Arctic. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 2008, 418 (1): 106–109. [In Russian].