

УДК 551.513:551.58:551.547.5

КЛИМАТОЛОГИЯ И МЕЖГОДОВЫЕ СМЕЩЕНИЯ ВЫСОТНЫХ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН В СРЕДНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

О. А. Разоронова*, П. А. Шабанов

Представлено академиком РАН Р.И. Нигматуллиным 22.12.2017 г.

Поступило 05.02.2017 г.

Представлена обновлённая климатология высотных фронтальных зон (ВФЗ) Северного полушария, основанная на численном анализе градиентов геопотенциала и выделении зон максимальных градиентов. Выявлены различия в положении ВФЗ при развитии меридиональных и зональных процессов. На основе анализа лет с преобладанием различных форм циркуляции показано, что положение высотных фронтальных зон — объективный диагностический инструмент для исследования современной климатической изменчивости.

Ключевые слова: высотные фронтальные зоны, градиент геопотенциала, зональные и меридиональные процессы, климатическая изменчивость.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524876684-690>

Высотные фронтальные зоны (ВФЗ), представляющие переходные высокоградиентные области между высокими холодными циклонами и высокими тёплыми антициклонами, являются важнейшими индикаторами климатической динамики атмосферы, положение и интенсивность которых в значительной степени определяют режимы атмосферной циркуляции и их межгодовую изменчивость. Высотные фронтовые зоны являются одним из важнейших факторов, определяющих динамику циклонической активности в средних широтах [10, 11] и смещение циклонических траекторий в Северном полушарии, которое является одним из самых обсуждаемых сегодня климатических сигналов [9]. При этом систематические исследования положения ВФЗ очень ограничены, они связаны в основном с определением характерной изогипсы [1, 2, 7], что не даёт возможности анализировать их долгопериодную динамику и региональные особенности. В данной работе нами впервые проведено детальное исследование положения ВФЗ в средней тропосфере для различных сезонов и выявлены межгодовые изменения в положении и интенсивности ВФЗ.

Предложенная нами методология для оценки положения ВФЗ [5] основана на численном анализе градиентов геопотенциала и выделении зон максимальных градиентов, что позволяет выделять несколько высотных фронтальных зон и идентифи-

цировать региональные ВФЗ для районов, характеризующихся неединственностью их положения.

В работе использовались данные о высоте изобарической поверхности H500 из реанализа NCEP-NCAR на сетке $2,5 \times 2,5$ градуса за период с 1948 по 2014 г. Было выделено восемь ВФЗ: 1) Азиатско-Тихоокеанская, 2) Североатлантическая, 3) Североамериканская, 4) Скандинавская, 5) Европейско-Сибирская, 6) Восточно-Арктическая, 7) Гренландская, 8) Афро-Южноазиатская. Их положение и структура имеют выраженную сезонную изменчивость, характеризующуюся ослаблением и смещением к северу ВФЗ в летний сезон и усилением и смещением к югу — в зимний. На рис. 1 представлены сезонные карты градиентов геопотенциала на высоте изобарической поверхности 500 гПа для зимнего (а) и летнего (б) периодов и сезонные положения основных ветвей ВФЗ. Как видно из рис. 1, ВФЗ могут существовать и как отдельные ветви и, соединяясь друг с другом, образовывать весьма протяжённые зоны барических контрастов. Сезонные изменения термического режима и барической топографии приводят к сезонному смещению ВФЗ и соответствующих им тропосферных фронтов, а также к их трансформации. В зимний период образование континентальных антициклонов (Сибирского, Североамериканского и Канадского), смыкающихся с субтропическими областями высокого давления, и углубление Исландской и Алеутской депрессий приводят к интенсификации среднетропосферных ВФЗ с максимальными градиентами

Институт океанологии им. П.П. Шишова
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: olgar@sail.msk.ru

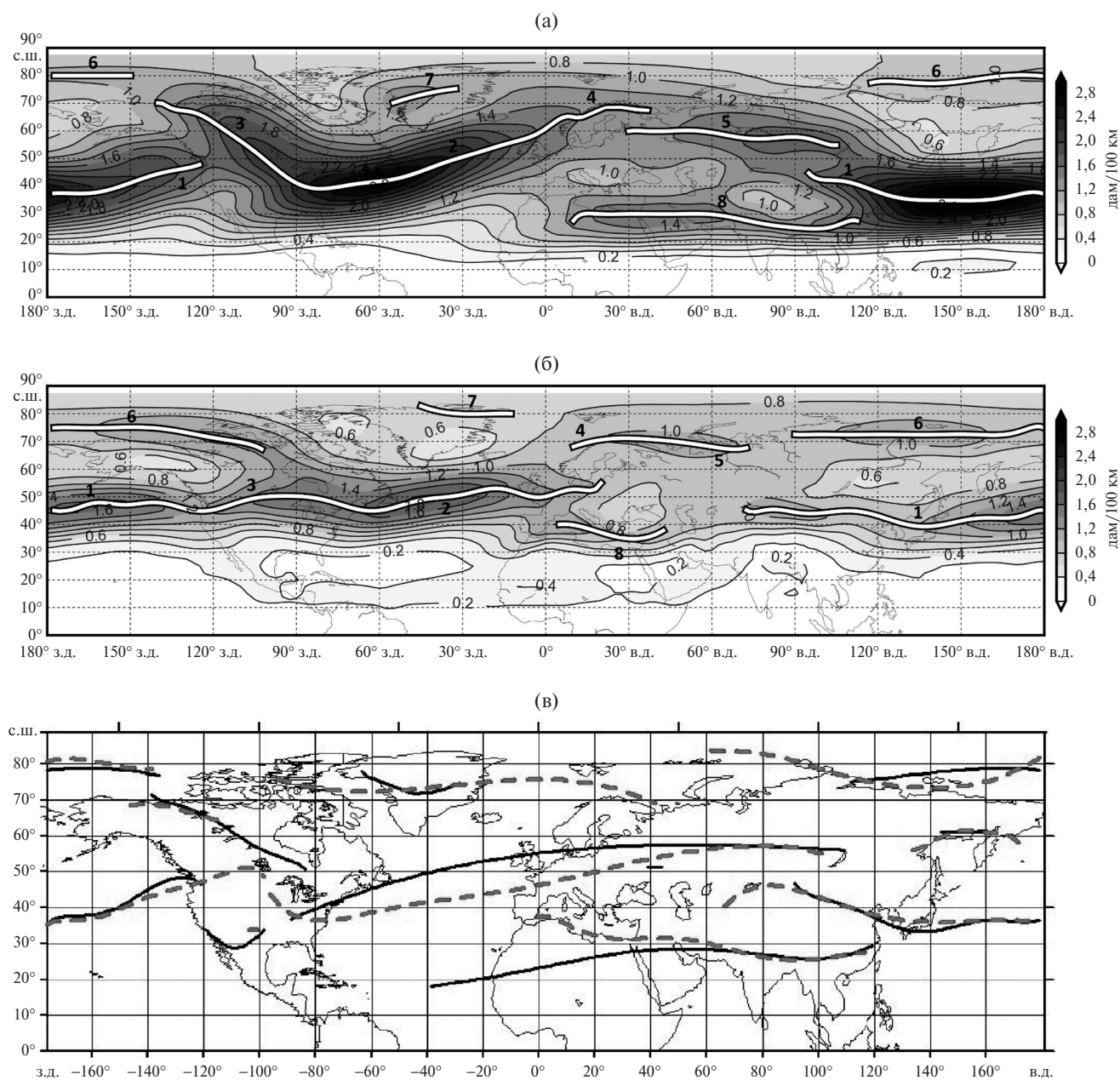


Рис. 1. Среднемноголетнее сезонное распределение высотных фронтальных зон Северного полушария на высоте изобарической поверхности 500 гПа (а, б) и распределение высотных фронтальных зон Северного полушария в зимний период на высоте изобарической поверхности 500 гПа при преобладании зональных (сплошная линия) и меридиональных (пунктирная линия) процессов (в).

2,8–3,0 дам/100 км. Североамериканская ВФЗ соединяется с Североатлантической, формируя U-образную ВФЗ в широтной полосе от 40° с.ш. до 70° с.ш. Взаимодействие Алеутской депрессии, Сибирского и Гавайского антициклонов обуславливает развитие Азиатско-Тихоокеанской ВФЗ с горизонтальными градиентами геопотенциала до 1,2–2,8 дам/100 км. Европейско-Сибирская ВФЗ над Евразией в широтном поясе 55°–60° с.ш. разделяет над ЕТС холодный континентальный и тёплый атлантический воздух, поступающий по южной пери-

ферии ложбины Исландского минимума, а над территорией Сибири — арктическую воздушную массу и континентальный умеренный воздух, сформированный в Сибирском антициклоне. Высокоширотные Восточно-Арктическая и Гренландская ВФЗ разделяют крупномасштабные ложбины и гребни в средней тропосфере, связанные соответственно с развитием Алеутской депрессии, антициклона над восточным сектором Арктики, Исландского минимума и Гренландского антициклона. В субтропических широтах отчётливо прослеживается Афро-Юж-

ноазиатская ВФЗ, разделяющая циркуляцию умеренных широт и субтропический пояс высокого давления. Летом ВФЗ занимают наиболее широтные положения, при этом Азиатско-Тихоокеанская, Североамериканская и Североатлантическая ВФЗ образуют единую зону около 45° с.ш. с максимальными градиентами 1,6–1,8 дам/100 км. На севере Евразии Скандинавская ВФЗ объединяется с европейской частью Европейско-Сибирской ВФЗ; вдоль побережья Северного Ледовитого океана проходит Восточно-Арктическая ВФЗ. Градиенты геопотенциала достигают значений 1,0–1,2 дам/100 км. Уменьшение температурных различий между тропической и умеренной воздушными массами приводит к ослаблению Африканской ВФЗ (градиенты геопотенциала не превышают 0,8–1,0 дам/100 км), которая смещается к северу в район Средиземноморья. Гренландская ВФЗ прослеживается в районе 80° с.ш. над севером Гренландии (градиенты геопотенциала составляют 1,0–1,2 дам/100 км), её устойчивость обусловлена круглогодичным существованием Гренландского антициклона. Весной и осенью распределение ВФЗ соответствует положению крупномасштабных ложбин и гребней в переходные сезоны.

Полученные на основе новой методики сезонные положения ВФЗ позволили существенно уточнить их климатическое положение и сезонную динамику, показывающую, что помимо двух основных зон повышенных градиентов геопотенциала [4] в северном полушарии наблюдаются устойчивые региональные ВФЗ, связанные с региональными особенностями атмосферных процессов. Обновлённая климатология ВФЗ также даёт возможность исследовать их межгодовую изменчивость и понять причины, её вызывающие. Она может быть успешно использована для исследования формирования различных форм атмосферной циркуляции над секторами Северного полушария. На рис. 1в представлено осреднённое за многолетний период распределение высотных фронтальных зон при преобладании зональных и меридиональных процессов над большей частью Северного полушария в зимний сезон. Зимний сезон выбран для анализа вследствие существования максимальных контрастов между звеньями земной климатической системы. Критерием для выбора лет с преобладанием меридиональных или зональных процессов послужил рассчитанный для различных секторов и для всего Северного полушария индекс Погосьяна–Павловской [5]. Из рис. 1 отчётливо видно, что даже при многолетнем осреднении атмосферных процессов, включающих

огромное разнообразие меридиональных и зональных форм, распределение ВФЗ различается при преобладании зональной и меридиональной циркуляции. При зональных процессах Атлантическая ВФЗ над Атлантическим океаном проходит севернее своего среднемноголетнего положения, распространяется на север Европы и соединяется с Европейско-Сибирской ВФЗ; меридиональные процессы характеризуются значительным её смещением к югу вплоть до субтропических широт на западе океана; в европейском секторе она проходит над центральными районами Европы и также соединяется с Европейско-Сибирской ВФЗ. Существенные различия в положении высотных фронтальных зон наблюдаются над Северной Америкой. При зональных процессах Североамериканская ВФЗ представлена отдельной ветвью; при меридиональных процессах южная её часть соединяется на востоке с Атлантической ВФЗ и на западе с Азиатско-Тихоокеанской, вследствие чего единая ВФЗ значительно выгибается к северу над Северной Америкой; калифорнийская ветвь, хорошо выраженная при зональных процессах, значительно ослаблена. Преобладание меридиональных процессов характеризуется интенсификацией и значительным распространением Гренландской ВФЗ как в западном направлении в район Канадского архипелага, так и в восточном, где она соединяется со скандинавской ветвью. Усиливается камчатская ветвь, обуславливая активизацию циклогенеза на Камчатке, в Магаданской области и на Чукотском полуострове. Распространение в Среднюю Азию азиатской ветви также приводит к усилению циклонической деятельности в этом регионе. Возрастает интенсивность Средиземноморской ВФЗ, что приводит к активному зимнему циклогенезу в странах Средиземноморья. При зональных процессах африканская ветвь занимает своё крайне южное положение и распространяется далеко на запад в южные широты Северной Атлантики.

На рис. 2 приведены положения ВФЗ и аномалии градиентов геопотенциала в отдельные годы с различными формами атмосферной циркуляции, также выбранные на основе индекса Погосьяна–Павловской: зимние сезоны с преобладанием меридиональной циркуляции над всем полушарием (1968–1969 гг.), зональной циркуляции над всем полушарием (1992–1993 гг.), а также зимние сезоны с различными типами циркуляции над секторами Северного полушария (1984–1985; 2011–2012 гг.). Анализ отдельных зимних сезонов демонстрирует значительную межгодовую изменчивость положения и интенсивности высотных фронтальных зон, зависящую

от развития конкретного циркуляционного процесса. При преобладании меридиональных процессов в зимний сезон 1968–1969 гг. интенсивный Сибирский антициклон распространялся практически на весь азиатский материк и Восточную Европу, что привело к суровым зимним условиям на всей территории России, в Закавказье, в Средней Азии. Аномально глубокая Алеутская депрессия сместилась в западном направлении к побережью Камчатки. Как следствие, Азиатско-Тихоокеанская ВФЗ характеризовалась значительной интенсивностью (до 3,8 дам/100 км), сформировалась Камчатская ВФЗ. Скандинавская ветвь сместилась к северу и объединилась с европейской частью Европейско-Сибирской ВФЗ, сибирская часть которой была слабо выражена. В этот же период Азорский антициклон был значительно ослаблен, как и Северо-

американский максимум, а центр Исландского минимума был смещён к северо-востоку и располагался над Норвежским морем, что привело к распространению обширной ложбины на всю Северную Атлантику. Рассмотренные циркуляционные условия обусловили значительное смещение североатлантической ветви ВФЗ к югу и смещение к северу гренландской ветви на 5° от своего среднемноголетнего положения и соединению её со скандинавской ветвью. Североамериканская ВФЗ существовала в виде двух участков: на крайнем северо-западе материка и на юге США, где соединялась с североатлантической ветвью. Рассмотренная ситуация наглядно отображена в поле аномалий градиента геопотенциала (рис. 2а) — обширная область отрицательной аномалии находится в зоне среднемноголетнего положения Североамериканской и Североатланти-

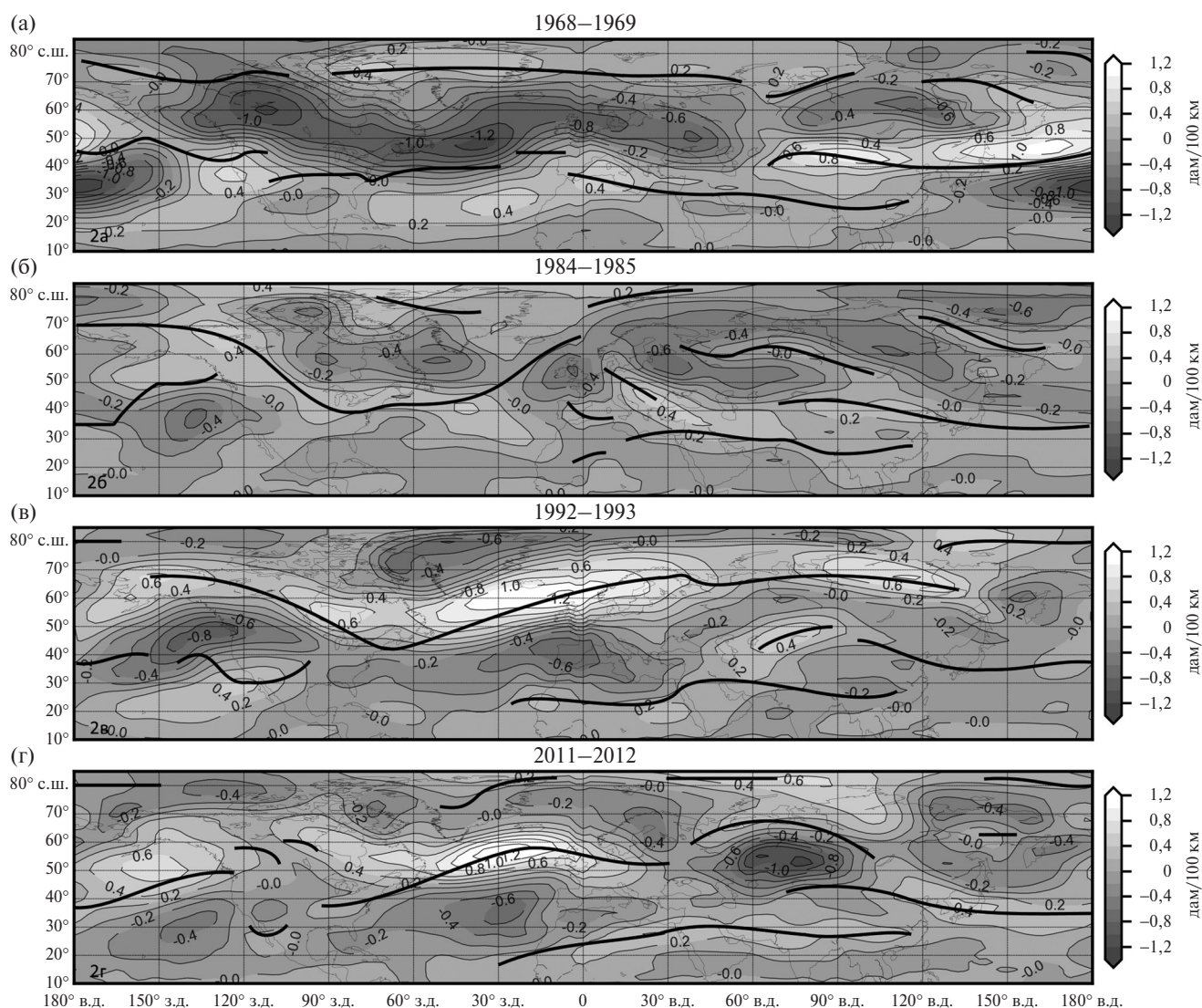


Рис. 2. Распределение высотных фронтальных зон Северного полушария на высоте изобарической поверхности 500 гПа и аномалий градиента геопотенциала в зимний сезон в отдельные годы.

ческой ВФЗ; ослабление Сибирской ВФЗ отражено в соответствующем очаге отрицательной аномалии градиента геопотенциала. Область положительных аномалий соответствует интенсивной Азиатско-Тихоокеанской ВФЗ; отчётливо прослеживается камчатская ветвь.

В зимний сезон 1984–1985 гг. положение высотных фронтальных зон близким к среднемноголетнему было в тихоокеанском секторе, а преобладание меридиональных форм циркуляции наблюдалось над американским, атлантическим и европейским секторами. Максимальный индекс меридиональности отмечался в европейском регионе. Большая его часть находилась под влиянием гребней Азорского и Сибирского максимумов, над Скандинавией сформировалась самостоятельная область высокого давления; циклоническая циркуляция наблюдалась в основном над южными районами Европы. Такая картина обусловила чередование ложбин и гребней и формирование нетипичных ветвей высотных фронтальных зон в средней тропосфере над Европой: самостоятельная ветвь ВФЗ протянулась практически в меридиональном направлении над Средней Европой вплоть до Причерноморья; Средиземноморская ВФЗ распалась на две части: западную и восточную. Скандинавская ВФЗ сместилась до 80° с.ш.; поле аномалий (рис. 26) хорошо иллюстрирует эту ситуацию. Подобное распределение ВФЗ объясняет погодные условия данного сезона: суровую зиму на ЕТР, в Карелии, Прибалтике, Белоруссии, Украине; обильные снегопады во Франции и на севере Африки. Наоборот, усиление и смещение к северу Камчатской ВФЗ обусловило мягкую зиму на Чукотке и в Магаданской области, где январские температуры были выше, чем в Крыму. Развитие в течение всех зимних месяцев ярко выраженного триполю на Северной Атлантике (Гренландский максимум — Исландский минимум — Азорский максимум) обеспечило интенсификацию Североатлантической ВФЗ и смещение к северу Гренландской ВФЗ. Усиление Североамериканского максимума привело к смещению среднетропосферного гребня к западу вдоль 140° з.д., что обусловило значительное смещение к северу (от 7° до 10°) восточной части Азиатско-Тихоокеанской ВФЗ, что подтверждается и полем аномалий градиента геопотенциала.

В зимний сезон 2011–2012 гг. отмечалось отклонение североатлантической ветви ВФЗ от среднемноголетнего положения на востоке Атлантики и распространение её на север Западной Европы (положительный очаг аномалии градиента геопотенциала на востоке Северной Атлантики с распро-

странением его на Британские острова и большую часть Западной и Южной Европы вплоть до Чёрного моря, рис. 2в), практическое исчезновение Скандинавской ВФЗ (отрицательный очаг аномалии градиента геопотенциала над Скандинавией), смещение центральной части Европейско-Сибирской ВФЗ до 70° с.ш. (диполь: положительная аномалия в зоне 70° – 80° с.ш. и отрицательная в зоне 40° – 60° с.ш. над Сибирским сектором) и образование черноморской ветви ВФЗ. Такая картина связана с развитием меридиональных процессов в европейском секторе, обусловленных образованием устойчивого антициклона, сформировавшегося из отрога Сибирского максимума, и обширного циклона с центром над Норвежским морем, а также смещением центра Азорского максимума к северо-востоку. При таких условиях происходило распространение холодного сибирского воздуха по периферии антициклона в Европу, что привело к необычайно суровой зиме в этом регионе, особенно в Южной Европе. Вынос тёплого атлантического воздуха осуществлялся по периферии высотной ложбины в высокие широты западного сектора Арктики, обусловив в данном регионе аномально тёплую погоду за весь период наблюдений. Нетипичное барическое поле наблюдалось над Северной Америкой: весь северо-восток континента вплоть до Великих озёр находился под влиянием ложбины, распространявшейся от восточного центра Исландского минимума; североамериканский зимний максимум был существенно ослаблен, смещён в субтропические широты, его центр располагался на западе США, около 40° с.ш. При таких циркуляционных условиях Североамериканская ВФЗ существовала в виде двух параллельных ветвей в умеренных широтах континента. Рассмотренная картина обеспечила тёплую зиму в Канаде и США, где во многих штатах прошли обильные снегопады. Интенсификация Калифорнийской ВФЗ привела к увеличению осадков в Калифорнии и аномальным дождям в Техасе. Над дальневосточным и тихоокеанским секторами преобладал зональный тип циркуляции, положение высотных фронтальных зон было близким к среднемноголетнему.

Зимний период 1992–1993 гг. характеризовался высоким зональным индексом циркуляции в умеренных и высоких широтах Северного полушария, что привело к формированию единой высокоградиентной ВФЗ, объединяющей североамериканскую, североатлантическую, скандинавскую и европейско-сибирскую ветви. Соответствующая этой единой

ВФЗ область положительной аномалии градиента геопотенциала отчётливо прослеживается в умеренных и высоких широтах Северного полушария на рис. 2г. При таких условиях полярно фронтальные циклоны беспрепятственно перемещались в восточном направлении, обусловив мягкую зиму на европейской территории России, в Карелии, Финляндии. Для этого года следует также отметить развитие высотной фронтальной зоны над Средней Азией и Южной Сибирью между крупномасштабной ложбиной, распространявшейся вдоль 60° в.д. до Средней Азии, где наблюдалось развитие интенсивного зимнего циклогенеза, и крупномасштабным гребнем вдоль 85° в.д. (очаг положительной аномалии градиентов геопотенциала от Каспийского моря до 90° в.д. в широтной зоне 35–55° с.ш.). Развитие данной ветви ВФЗ обеспечило мягкую зиму на Алтае.

Приведённый рис. 2 показывает, что высотные фронтальные зоны могут быть успешно использованы при диагнозе современных климатических колебаний над различными регионами земного шара. Преобладание зональных форм циркуляции над всем Северным полушарием обуславливает развитие, как правило, единой высотной фронтальной зоны, тогда как меридиональные процессы порождают формирование отдельных ярко выраженных ветвей ВФЗ, которые испытывают значительные колебания, зависящие от развития конкретного меридионального процесса. Поскольку положение ВФЗ определяется взаимодействием крупномасштабных ложбин и гребней, их смещение позволяет проследить перемещения воздушных масс в тропосфере, выявить аномалии циркуляционных процессов, в том числе исследовать блокирующие ситуации [8]. Положение высотных фронтальных зон — объективный диагностический инструмент для определения периодов с преобладающими зо-

нальными и меридиональными формами циркуляции. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы при исследовании отклика атмосферной циркуляции на сигналы Мирового океана [6].

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания (№ 0149–2018–0001) и при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих учёных (договор № 14.В25.31.0026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Байдал М.Х., Ханжина Д.Г.* Многолетняя изменчивость макроциркуляционных факторов климата. М.: Гидрометеиздат, 1986. 100 с.
2. *Дуйцева М.А., Педь Д.А.* // Тр. Гидрометцентра СССР. 1970. В. 62. С. 64–72.
3. *Погосян Х.П.* Планетарные высотные фронтальные зоны в Северном и Южном полушариях. Л.: Гидрометеиздат, 1955. 59 с.
4. *Погосян Х.П., Павловская А.А.* Аномалии атмосферной циркуляции приземного давления и температуры в связи с квазидвухлетней цикличностью. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 79 с.
5. *Разоренова О.А.* // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 5–16.
6. *Разоренова О.А., Шабанов П.А.* // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 1–5.
7. *Храбров Ю.Б.* // Труды ЦИП. 1957. В. 63. С. 46–61.
8. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 5–18.
9. *Eichler T.P., Gottschalck J.* Advances in Meteorology. 2013. Article ID545463. P. 1–15. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/545463>
10. *Gulev S.K., Jung T., Ruprecht E.* // J. Climate. 2002. V. 15. P. 809–828.
11. *Ulbrich U., Christoph M.* // Climate Dynamics. 1999. V. 15. Iss. 7. P. 551–559.

CLIMATOLOGY AND ANNUAL DISPLACEMENT OF THE UPPER-LEVEL FRONTAL ZONES IN THE MIDDLE TROPOSPHERE OF THE NORTHERN HEMISPHERE

O. A. Razorenova, P. A. Shabanov

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS R.I. Nigmatullin December 22, 2017

Received February 5, 2018

An updated climatology of upper level frontal zones (UFZ) of the Northern Hemisphere is presented, based on a numerical analysis of geopotential gradients and the allocation of maximum gradient zones. Differences in the position of the UFZ during the development of meridional and zonal processes are revealed. Based on the analysis of years with the predominance of various forms of circulation, it is shown that the position of high-altitude frontal zones is an objective diagnostic tool for studying modern climate variability.

Keywords: upper level frontal zones, geopotential gradient, zonal and meridional processes, climate variability.