

ТЕОРИЯ И СОЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ГЕОГРАФИИ

УДК 551.515.8 (471.0) + 551.583 (471.0) : 551.5.001.57 (471.0)

ВОЗМОЖНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПОЛЯРНОГО ФРОНТА НАД ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНОЙ В СЕРЕДИНЕ XXI в.¹

© 2012 г. Е.А. Черенкова*, И.М. Школьник**

*Институт географии РАН

** Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

Поступила в редакцию 09.09.2011 г.

В статье исследовано положение полярного фронта и его возможное изменение на Европейской территории России в летний сезон по результатам численного моделирования климата на региональной климатической модели ГГО в середине XXI в. Рассмотрен наиболее простой метод выявления положения полярного фронта на карте с помощью определения областей повышенных градиентов температуры. Полярный фронт по модельным оценкам ориентирован несколько больше в меридиональном направлении по сравнению с климатологическим полярным фронтом, определенным С.П. Хромовым. Выявлена устойчивость положения полярного фронта в различные климатологические периоды: в середине XXI в. можно ожидать смещения области наибольших градиентов температуры к югу на один градус относительно положения аналогичной области в последнем десятилетии XX в.

Введение. В начале XX в. норвежский физик В. Бьеркнес совместно с группой ученых-метеорологов предложил теорию полярного фронта, в основе которой была модель формирования циклона в пределах переходной области, разделяющей теплый тропический воздух и холодные полярные массы воздуха в средних широтах [13]. В 1930-х годах при изучении фронтообразования А.И. Аскназий обратил внимание на тот факт, что при обострении над материком окклюдий атлантического полярного фронта формируется зона повышенных градиентов, которая получила название летнего полярного фронта над Восточно-Европейской равниной (ВЕР) [2]. С.П. Хромов уточнил на карте географическое местоположение полярного фронта в июле над территорией ВЕР [7, 9] и определил понятие “климатологический фронт” как среднее положение фронтов определенного географического типа в определенном районе [8]. Кроме европейской ветви полярного фронта существует его азиатская ветвь, проходящая над Западно-Сибирской низменностью (ЗСН) [6]. Исследование взаимосвязи изменения градиентов температур и осадков с растительностью летом на Европейской территории России (ЕТР) в различные климатические периоды было выполнено по данным сети метеостанций в пери-

од с 1931 по 2001 г. [4]. Повышенный интерес к полярному фронту летом над Евразией обусловлен продолжающимся глобальным потеплением климата, наиболее заметно проявляющимся по данным наблюдений и климатических моделей на Восточно-Европейской равнине и Западно-Сибирской низменности [3, 5]. В этой связи изучение ожидаемых изменений размещения полярного фронта в середине XXI в. приобретает особую актуальность.

Цель статьи – исследование воспроизведения положения полярного фронта и его изменения над Восточно-Европейской равниной на территории России летом по результатам численного моделирования климата по региональной климатической модели в середине XXI в.

Данные и методы. По определению, географическое положение полярного фронта находится в районе наиболее часто повторяющихся синоптических фронтов. Для такого района характерны наибольшие абсолютные значения горизонтального градиента приземной температуры воздуха. При расчете градиента были использованы результаты численного эксперимента по региональной климатической модели (РКМ) ГГО им. А.И. Воейкова по моделированию климата на территории России в конце XX и в середине XXI вв. Исследования проводились на Восточно-Европейской равнине в рамках территории

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ-10-05-00407).

России, ограниченной с запада приблизительно 30° в.д., с востока – 60° в.д.

Региональная модель ГГО [10] встроена в глобальную модель общей циркуляции атмосферы ГГО T24L14 [12] и имеет горизонтальное разрешение 50 км. Обе модели включают описание всех основных физических процессов в атмосфере и на подстилающей поверхности – это конвекция и конденсация, радиационный перенос в облачной атмосфере с учетом суточного хода, горизонтальный и вертикальный турбулентный обмен теплом, влагой и моментом количества движения, гравитационно-волновое сопротивление, тепло- и влагообмен в деятельном слое почвы. Расчеты с помощью системы глобальной и региональной моделей выполнены по сценарию эмиссий парниковых газов и аэрозолей В2 МГЭИК [14], который соответствует умеренному росту содержания парниковых газов в атмосфере в XXI в. Периоды расчетов включают два 10-летних “окна” – периоды 1991–2000 гг. и 2041–2050 гг. Особенностью РКМ является то, что в отличие от глобальных моделей низкого пространственного разрешения региональная модель с разрешением 50 км учитывает географические особенности территории ЕТР и АТР с высокой степенью детализации: наличие больших внутренних естественных и искусственных водоемов, играющих существенную роль в формировании локального влагооборота, а также горных систем, воздействующих на перемещение воздушных масс над Восточно-Европейской равниной.

Из большого набора характеристик климата, которые были получены в результате расчета регионального климата, в данной статье рассматривается приземная температура воздуха. Изменения приземной температуры воздуха и ее горизонтального градиента в 2041–2050 гг. рассматриваются по отношению к периоду 1991–2000 гг.

В узлах сетки РКМ на основе среднесуточных значений приземной температуры воздуха для обоих “окон” рассчитывались средние многолетние температуры воздуха с июня по август. Затем на основе интерполированных методом кригинга данных с помощью ГИС MapInfo были построены пространственные распределения средней месячной приземной температуры воздуха и ее градиента за указанные периоды. Статистическая значимость изменений результатов оценивалась с помощью критерия Стьюдента (с уровнем значимости 0.95) для временных рядов разной длины.

Проведенное сравнение средней многолетней температуры по региональной модели с данны-

ми наблюдений [1] за базовый период (1991–2000 гг.) выявило корреляционную зависимость с коэффициентом корреляции 0.71. Межгодовая и внутригодовая среднемесячная изменчивость температуры занижается моделью на 7–25% по сравнению с данными наблюдений [11]. В летний сезон 1991–2000 гг. модель воспроизводит завышенные по сравнению с наблюдаемыми значения приземной температуры на большей части территории исследования (до 1.5°C). Наиболее заметные погрешности РКМ обнаруживаются на юге ВЕР и в Предуралье – там отклонения от данных наблюдений составляют до 2.5°C. Эти отклонения, по-видимому, обусловлены значительными ошибками в расчете температуры в условиях сложной орографии и некоторыми погрешностями в описании радиационного баланса на подстилающей поверхности.

Абсолютная величина градиента температуры Gt (градус Цельсия / 1 градус широты) была рассчитана по формуле

$$Gt = \sqrt{Gx^2 + Gy^2}, \quad (1)$$

где $Gx = (t_{i+1,j} + t_{i+1,j+1} - t_{i,j} - t_{i,j+1}) / (2 \cdot \cos \varphi)$ – широтная составляющая вектора температурного градиента, $Gy = (t_{i,j+1} + t_{i+1,j+1} - t_{i,j} - t_{i+1,j}) / 2$ – меридиональная составляющая вектора, i – увеличивающийся с запада на восток индекс ячейки сетки модели по долготе, j – увеличивающийся с юга на север индекс ячейки сетки модели по широте, φ – географическая широта, на которой находится ячейка сетки.

Анализ результатов. Как показал анализ, в целом на рассматриваемой территории ожидаемое потепление в летний сезон может составить 0.7 °C. Как видно из рис. 1, наиболее заметно потеплеет в южных и восточных районах Восточно-Европейской равнины (до 1.4 °C в предгорьях Кавказа и в Предуралье). С юга на север величина потепления уменьшается. В летние месяцы потепление выражено менее всего в центре и на западе ВЕР (0.2 °C). К востоку потепление усилится от 0.4 °C до 1.4 °C.

Определим географическое местоположение полярного фронта в середине XXI в. и выясним, как потепление, ожидаемое в 2041–2050 гг. согласно сценарию РКМ ГГО, отразится на изменении положения полярного фронта по сравнению с базовым периодом. В статье рассмотрен наиболее простой метод выявления положения полярного фронта (областей повышенных градиентов приземной температуры). По модельным оценкам, на территории региона обнаруживается область температурных градиентов с двумя максимумами

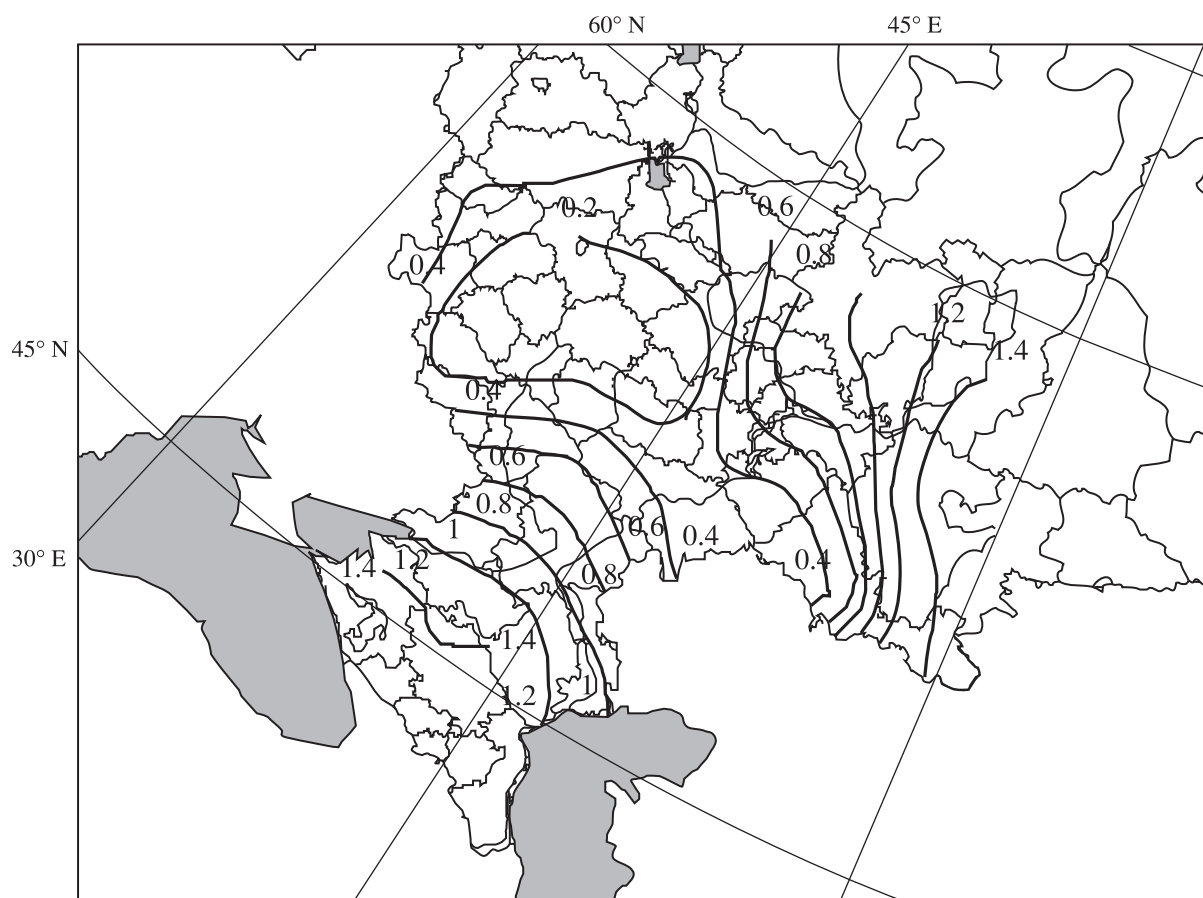


Рис. 1. Ожидаемые изменения средней многолетней температуры воздуха летом в период 2041–2050 гг. по сравнению с 1991–2000 гг. по данным РКМ ГГО с учетом сценария В2 МГЭИК.

(рис. 2, таблица). С июня по август географическое положение этих максимумов и абсолютные значения градиентов несколько варьируются, однако сами максимумы присутствуют на территории исследования во все летние месяцы. Переходная

зона, соединяющая максимумы в направлении с запада на восток, может быть интерпретирована как климатологический полярный фронт. Необходимо отметить, что при сравнении с данными наблюдений, на основе которых даются оценки

Таблица. Области максимальных градиентов температуры (град.) и средние значения горизонтального градиента температуры ($^{\circ}\text{C}$) над Восточно-Европейской равниной в периоды 1991–2000 и 2041–2050 гг. по данным РКМ ГГО

Месяц	Границы области				Градиент температуры на ВЕР	
	1991–2000 гг.		2041–2050 гг.		1991–2000 гг.	2041–2050 гг.
	широта	долгота	широта	долгота		
июнь	51–53	31–42	50–55	30–56	1.29	1.15
июль	51–55	43–56	50–54	28–56	1.09	1.08
	50–53	29–39				
август	50–55	43–57	50–52	30–39	0.94	0.97
	51–53	29–35				
лето	51–54	44–54	53–54	40–56	1.1	1.07
	50–53	29–39	50–55	30–55		
	51–55	43–56				

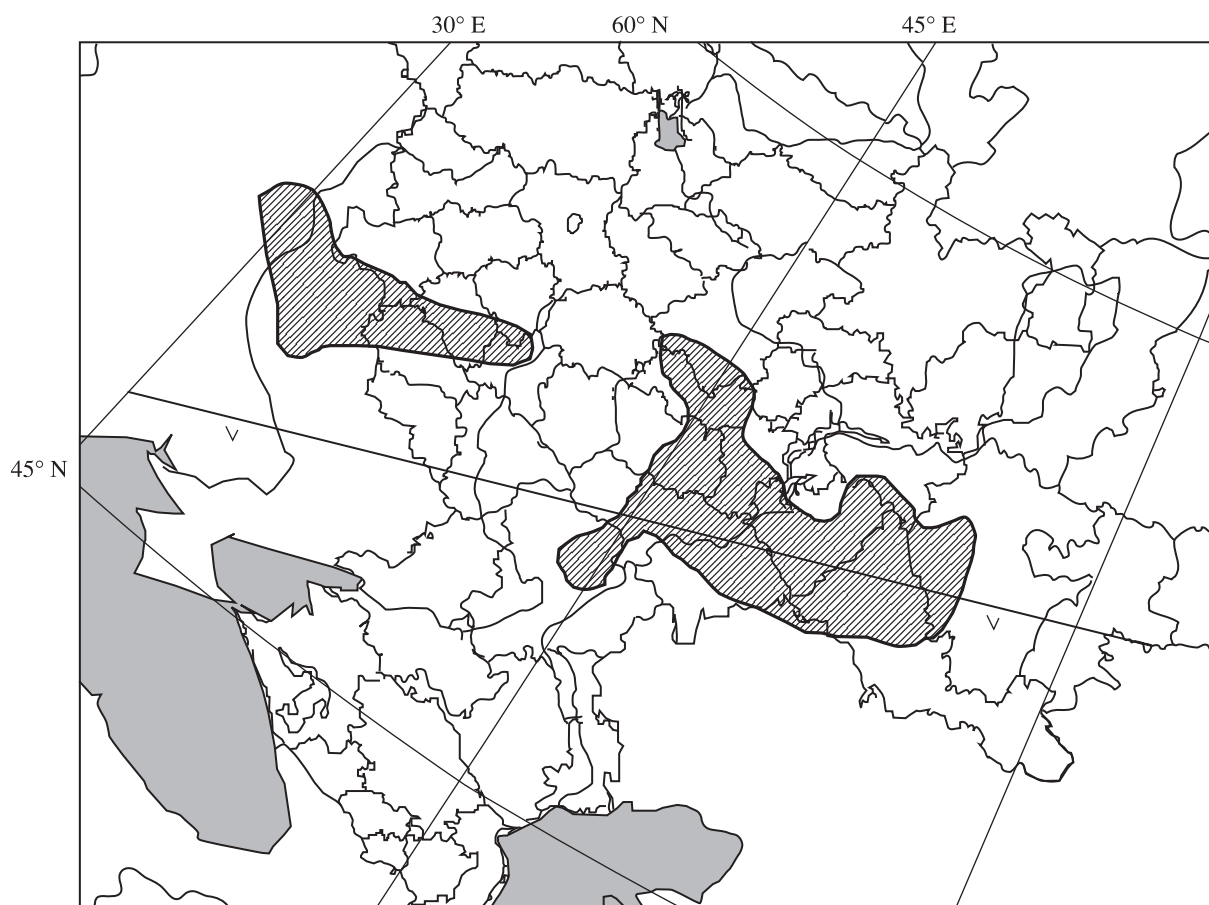


Рис. 2. Положение полярного фронта летом: ▽ полярный фронт (Хромов, 1940), наибольшие градиенты температуры °С (показаны штриховкой) в июле 1991–2000 гг. по данным РКМ ГТО.

положения климатологического полярного фронта (Хромов, 1940), модельный полярный фронт в большей степени ориентирован в широтном направлении.

Ожидаемая в середине XXI в. площадь максимальных градиентов больше, чем в базовом периоде. В июне и июле в период 2041–2050 гг. над ВЕР будет наблюдаться область с одним максимумом, пространственно включающая области двух максимумов, наблюдавшихся в последнее десятилетие XX в.

Из таблицы следует, что в июне, июле и в среднем за лето 2041–2050 гг., по сравнению с базовым периодом прослеживается тенденция уменьшения средних значений градиентов температуры на территории ВЕР, а в августе – их некоторого увеличения. Следует заметить, что абсолютные значения изменений незначительны.

Рассмотрим зонально осредненную картину изменений градиента температуры с июня по август над Восточно-Европейской равниной, полученную по РКМ в середине XXI в. по отно-

шению к базовому периоду. Как видно из рис. 3, максимальные значения градиента температуры над ВЕР в периоды исследования приходятся на диапазон широт 52–53° с.ш.

Как видим, положение полярного фронта над территорией ВЕР по данным моделирования достаточно устойчиво: в середине XXI в. возможно ожидать смещение области максимальных градиентов к югу на один градус относительно последнего десятилетия XX в. Однако эти изменения не являются статистически значимыми (с уровнем значимости 0.95).

Заключение. В исследовании оценивается качество воспроизведения региональной климатической моделью положения полярного фронта летом над Восточно-Европейской равниной и дается один из возможных прогнозов его изменений к середине XXI в. с использованием региональной модели ГТО и сценария В2 МГЭИК. Показано, что потепление в середине XXI в. в среднем на 0.7 °С не окажет значимого влияния на циркуляцию воздушных масс в рассмотренном регионе: ожидаемое положение полярного фрон-

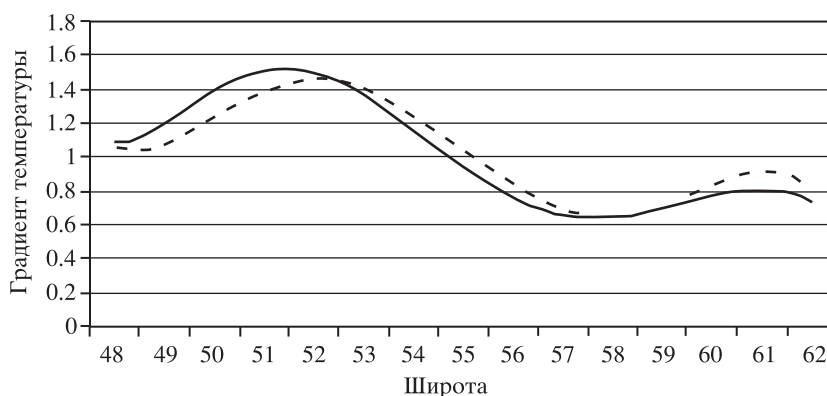


Рис. 3. Широтное изменение градиента температуры (°C) за лето в период 1991–2000 гг. (пунктирная линия) и 2041–2050 гг. (сплошная линия) над Восточно-Европейской равниной по данным РКМ ГГО

та летом над Восточно-Европейской равниной не подвергнется существенным изменениям, горизонтальные градиенты приземной температуры уменьшатся незначительно. В случае реализации других, более “агрессивных” сценариев эмиссий парниковых газов и аэрозолей (например, A2), следует, по-видимому, ожидать больших изменений положения полярного фронта. Что касается использованного в исследовании умеренного сценария B2, то существенное изменение положения фронта возможно к концу XXI в., когда прогнозируемый по моделям рост температуры воздуха у подстилающей поверхности будет значительно больше естественной изменчивости климата.

Авторы выражают благодарность профессору А.Н. Золотокрылину за помощь в подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архив данных ВНИИГМИ-МЦД (Обнинск) (<http://www.meteo.ru>).
2. Аскназий А.И. К вопросу о летней циркуляции территорий Союза // Журн. геофизики. 1934. Т. 4. № 4 (14). С. 423–439.
3. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Аристова Л.Н., Клещенко Л.К. О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России. Метеорология и гидрология. 2006. № 10. С. 5–23.
4. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Климатический фактор динамики растительности засушливых земель европейской территории России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 2009. Т. XXII. С. 79–91.
5. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Т. I. Изменения климата. М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). 227 с.
6. Справочник эколого-климатических характеристик Москвы / Под ред. д.г.н. А.А.Исаева. М.: Географический ф-т МГУ. 2005. Т. 2. 410 с.
7. Хромов С.П. Новые карты главных фронтальных зон // Метеорология и гидрология. 1940. № 8. С. 11–19.
8. Хромов С.П. Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометиздат. 1948. 696 с.
9. Хромов С.П. Географическое размещение климатологических фронтов. // Изв. Всесоюз. геогр. общ-ва. 1950. № 2. С. 126–137.
10. Школьник И.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В. Региональная гидродинамическая модель атмосферы для исследования климата на территории России // Метеорология и гидрология. 2000. № 4. С. 32–49.
11. Школьник И.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М. Валидация региональной климатической модели ГГО. // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 14–27.
12. Шнееров Б.Е., Мелешко В.П., Матюгин В.А. и др. Современное состояние глобальной модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-2) // Тр. ГГО. 2001. Вып. 550. С. 3–43.
13. Bjerknes J., Solberg H. Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation // Geofysiske Publikationer. 1922. V. 3. № 1. P. 1–18.
14. IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds.: Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge, United Kingdom and N.Y., USA: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
15. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 434–471.

Possible Location of the Polar Front Over the Eastern European Plain in the Middle of the 21 Century

Ye.A. Cherenkova ^{*}, I.M. Shkolnik ^{}**

^{} Institute of Geography RAS, Russian Academy of Sciences*

*^{**} Voeikov Main Geophysical Observatory*

The location of the polar front and its possible change in European Russia during a summer season in the middle of the 21 century is investigated based on the results of climate modeling on a regional climate model of Main Geophysical Observatory. The simplest method to identify the location of the polar front on the map using the areas of high temperature gradients is examined. The polar front orientation will become more meridional according to model data in comparison with climatological polar front identified by Khromov in the 20 century. The stability of the polar front during the various climatological periods is revealed. It is possible to expect a shift of the area of largest temperature gradients to the south in the middle of the 21 century on one degree of latitude compared with the last decade of the 20 century.