

УДК 551.590.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ЭФФЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ЦИРКУЛЯЦИИ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ

© 2012 г. С. В. Веретененко<sup>1</sup>, М. Г. Огурцов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Главная Астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург

e-mail: s.veretenenko@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 03.11.2010 г.

После доработки 31.10.2011 г.

Исследована пространственно-временная структура эффектов солнечной активности (СА) и вариаций потока галактических космических лучей (ГКЛ) в циркуляции нижней атмосферы по данным архивов реанализа NCEP/NCAR за 1948–2006 гг. и MSLP (Climatic Research Unit, UK) за 1873–2000 гг. Показано, что эффекты ГКЛ в вариациях давления имеют ярко выраженный широтно-региональный характер, определяемый особенностями тропосферной циркуляции в исследуемых регионах. Распределение коэффициентов корреляции среднегодовых значений атмосферного давления с интенсивностью потока ГКЛ тесно связано с положением основных климатологических фронтов. Обнаружены периодические (~60 лет) изменения знака корреляции давления в высоких и умеренных широтах с числами Вольфа. Предположено, что изменения знака эффектов СА/ГКЛ в атмосферном давлении обусловлены сменой эпох макроциркуляционного режима атмосферы, которые, в свою очередь, могут быть связаны с крупномасштабными процессами на Солнце.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение влияния солнечной активности на циркуляцию нижней атмосферы, погоду и климат является нестареющей научной проблемой, которая привлекает внимание исследователей на протяжении нескольких десятилетий. Тем не менее, вопрос о физическом механизме воздействия возмущений на Солнце и в околоземном пространстве на состояние нижней атмосферы и, соответственно, о возможности использования наших знаний о солнечной активности для климатических и метеорологических прогнозов до сих пор остается открытым. Особо важное значение проблема солнечно-атмосферных связей приобрела в связи с оживленной дискуссией о природе глобального потепления.

В последние 20–30 лет получены многочисленные свидетельства реальности солнечно-климатических связей и важности роли корпускулярного космического излучения для передачи влияния солнечной активности в нижние слои атмосферы [Tinsley and Deen, 1991; Пудовкин и Распопов, 1992; Pudovkin and Veretenenko, 1996; March and Svensmark, 2000; Tinsley, 2008 и т.д.]. Тем не менее, в классической метеорологии и климатологии нередко отрицается возможность влияния активности Солнца на земной климат и перспективность исследований в этом направлении. Основные претензии к гелиоклиматологии

можно вкратце суммировать в следующем виде [Монин, 1969; Питток, 1982]:

1) Связи между солнечной активностью и явлениями погоды и климата исследуются, в большинстве случаев, без должной строгости.

2) Упомянутые во многих работах солнечно-климатические связи оказываются неустойчивыми во времени и пространстве – то появляются, то исчезают, меняются знаки корреляций и т.д.

3) Механизм предполагаемого воздействия солнечной активности на тропосферу неизвестен.

Следует отметить, что в последние годы наметились тенденции к качественно новому пониманию процессов, обеспечивающих связь между атмосферной циркуляцией и солнечной активностью. Были предложены принципиально новые физические механизмы, появились новые экспериментальные данные, дающие возможность более полного и всестороннего анализа атмосферного отклика на события на Солнце и в межпланетной среде (см. обзоры Авдюшина и Данилова [2000], Пудовкина [Pudovkin, 2004]). Тем не менее, причины неустойчивости эффектов солнечной активности в вариациях климатических и метеорологических параметров остаются невыясненными. В связи с этим в настоящей работе проводится исследование пространственно-временных вариаций долгопериодных эффектов

солнечной активности (СА) и галактических космических лучей (ГКЛ) в циркуляции нижней атмосферы и рассматриваются возможные причины наблюдаемых вариаций.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

### 2.1 Эффекты галактических космических лучей в вариациях тропосферного давления по данным реанализа NCEP/NCAR

В качестве экспериментального материала для исследования эффектов ГКЛ в вариациях давления в тропосфере использовались среднегодовые значения геопотенциальных высот изобарического уровня 700 гПа (*GPH700*), рассчитанные по данным реанализа NCEP/NCAR за 1948–2006 гг. [Kalnay et al., 1996]. Данные реанализа NCEP/NCAR представляют собой комплексный архив данных, созданный Национальным Центром Прогноза Окружающей Среды США (NCEP) совместно с Национальным Центром Атмосферных Исследований (NCAR) для исследования атмосферных процессов в глобальном и региональном масштабе. Архив включает поля всех основных метеорологических параметров, полученных из различных источников (метеорологические, радиозондовые, самолетные, спутниковые и т.д.) и преобразованных (ассимилированных) в сеточный набор данных  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  с использованием моделей общей циркуляции атмосферы.

Интенсивность потока ГКЛ характеризовалась среднегодовыми значениями скорости счета нейтронного монитора (*NM*) в Клаймаксе (географические координаты  $\varphi = 39^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda = 106^\circ \text{ W}$ , жесткость геомагнитного обрезания 2.99 ГВ) за период 1953–2005 гг. [[http://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/COSMIC\\_RAYS/](http://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/COSMIC_RAYS/)]. Для оценки значений скорости счета до 1953 года использовались данные работы [McCracken and Beer, 2007].

Результаты корреляционного анализа показали, что изменения давления, связанные с вариациями интенсивности потока ГКЛ, наблюдаются по всему земному шару, однако их характер обнаруживает отчетливо выраженную пространственно-временную изменчивость. На рисунке 1 представлены карты коэффициентов корреляции  $R(GPH700, NM)$  между давлением в тропосфере и скоростью счета нейтронного монитора в Клаймаксе для периодов 1953–1981 и 1982–2000 гг., наиболее наглядно показывающие региональность атмосферного отклика на вариации ГКЛ, а также изменение его характера в зависимости от рассматриваемого временного периода. Там же показано климатическое (среднее многолетнее) положение основных атмосферных фронтов согласно Хромову и Петросянцу [1994]. Значимость

коэффициентов корреляции оценивалась методом рандомизации фаз [Ebisuzaki, 1997].

Данные, приведенные на рис. 1а для периода 1982–2000 гг., показывают несколько четко выраженных областей положительной и отрицательной корреляции между давлением в тропосфере и интенсивностью ГКЛ:

1) Высокоширотная область положительной корреляции в северном полушарии (коэффициенты корреляции  $R(GPH700, NM) \sim 0.6–0.7$ , статистическая значимость  $P = 0.97–0.98$ ). Границы этой области совпадают с климатическим положением арктического фронта, разделяющего холодные арктические воздушные массы, где формируются приземные антициклоны, от более теплого воздуха умеренных широт. Положительные значения  $R(GPH700, NM)$  свидетельствуют об интенсификации арктических антициклонов при росте интенсивности ГКЛ в рассматриваемый временной период.

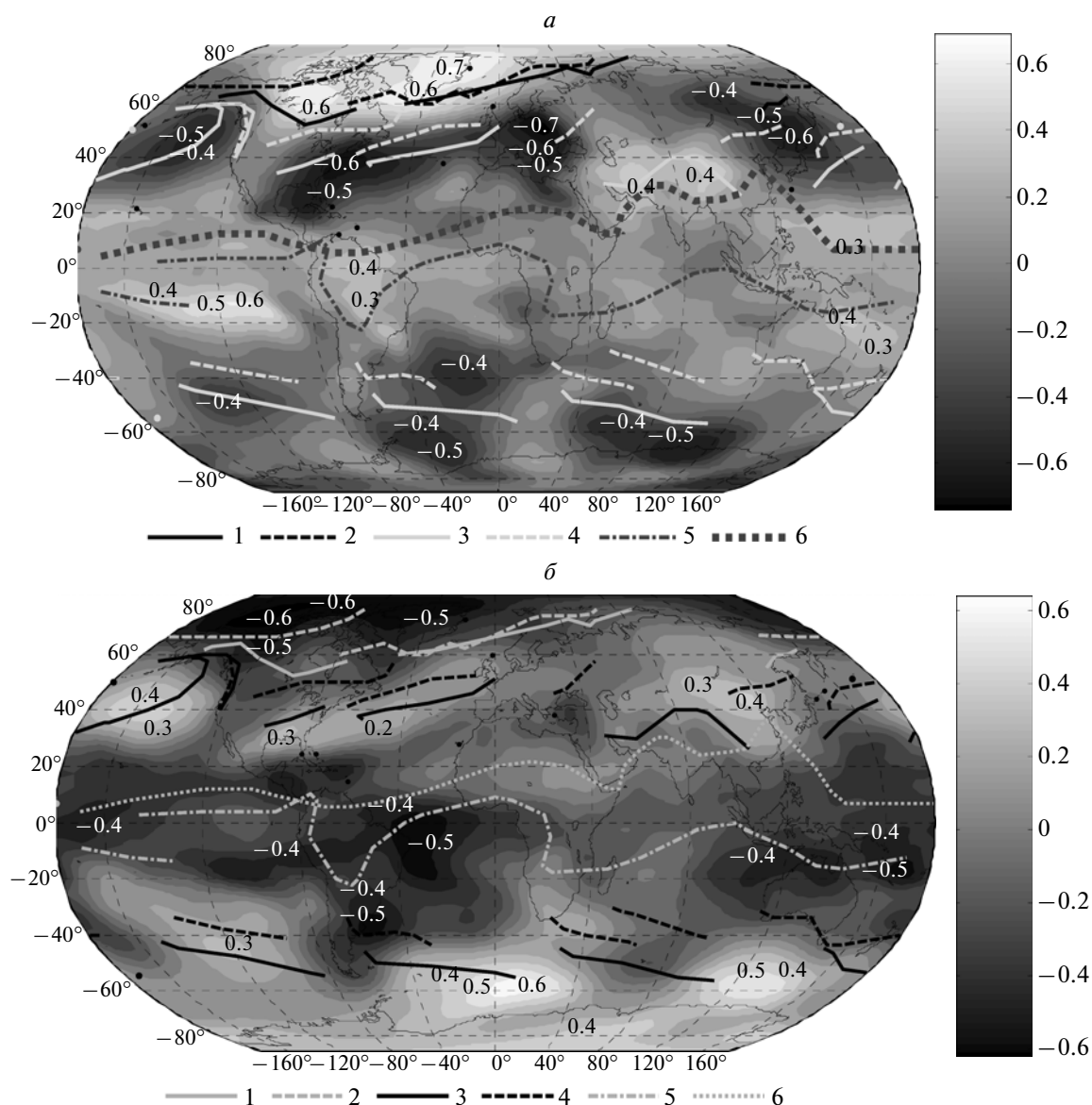
2) Области отрицательной корреляции в умеренных широтах северного и южного полушарий, преимущественно у берегов материков и над океанами ( $R(GPH700, NM) \sim -0.5...-0.6$ ,  $P = 0.95–0.97$ ). Эти области совпадают с климатическим положением полярных фронтов, отделяющих воздушные массы умеренных широт от тропического воздуха. Поскольку с полярными фронтами связано интенсивное формирование и развитие внетропических циклонов, наблюдаемая отрицательная корреляция свидетельствует об усилении циклогенеза при увеличении интенсивности ГКЛ в данный период.

3) Низкоширотная область слабой положительной корреляции ( $R(GPH700, NM) \sim 0.3–0.4$ ,  $P \leq 0.90$ , за исключением тихоокеанского региона) в районе экваториальной ложбины (области пониженного давления, где наблюдается сходимость пассатных течений и формирование тропических циклонов).

4) Область отрицательной корреляции в высоких широтах южного полушария ( $R(GPH700, NM) \sim -0.4–0.5$ ,  $P = 0.95–0.97$ ).

Распределение коэффициентов корреляции между давлением в тропосфере и потоками ГКЛ для периода 1953–1981 гг. (рис. 1б) обнаруживает региональную структуру, аналогичную наблюдаемой в период 1982–2000 гг., т.е. тесно связанную с положением атмосферных фронтов. Тем не менее, в выделенных ранее регионах знак корреляции изменился на противоположный.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о четко выраженном широтно-региональном характере эффектов ГКЛ в тропосферном давлении. Наибольшие абсолютные значения коэффициентов корреляции отмечаются в высоких и умеренных широтах. На низких широтах отклик атмосферы на вариации ГКЛ, как пра-



**Рис. 1.** Распределение коэффициентов корреляции между среднегодовыми значениями геопотенциальной высоты изобарического уровня 700 гПа и интенсивности потока ГКЛ для периодов 1982–2000 гг. (а) и 1953–1981 гг. (б). Положения климатологических фронтов согласно [Хромов и Петросянц, 1994] показаны линиями: 1 – арктический фронт, январь; 2 – арктический фронт, июль; 3 – полярный фронт, январь; 4 – полярный фронт, июль; 5 – ось экваториальной ложбины, январь; 6 – ось экваториальной ложбины, июль.

вило, выражен слабее. Зависимость распределения коэффициентов корреляции от положения основных атмосферных фронтов свидетельствует о том, что характер изменений давления в связи с вариациями ГКЛ определяется особенностями барических систем, формирующихся в выделенных регионах. При этом в зависимости от временного периода при росте потока ГКЛ может наблюдаться как интенсификация барических формирований, характерных для данного региона, так и их ослабление.

Региональный характер отклика атмосферы на вариации солнечной активности и потоков ГКЛ

на разных временных шкалах отмечался ранее в ряде работ. В работе [Веретененко и Тайл, 2008] показано, что после всплесков энергичных СКЛ наблюдается интенсификация циклонов (понижение давления) в районе Гренландии с одновременным формированием областей высокого давления над Атлантикой и у берегов Северной Америки. В ходе форбуш-понижений ГКЛ области высокого давления, обусловленные интенсификацией блокирующих антициклонов, формируются преимущественно над Северной Европой и севером европейской части России [Artamonova and Veretenenko, 2011]. Таким образом, на времен-

ных шкалах порядка суток региональность атмосферного отклика на вариации СА/ГКЛ обусловлена изменениями в эволюции барических образований в регионах с благоприятной структурой термобарического поля [Веретененко и Тайл, 2008], а также изменениями их перемещений [Mogozova et al., 2002]. На более длительных временных шкалах физические причины региональности климатического отклика на воздействие солнечной активности имеют, по-видимому, более сложный характер и включают также долгопериодные процессы, развивающиеся в системе “атмосфера—океан” [Распопов и Дергачев, 2009]. Региональность отклика атмосферы на ~200-летние вариации солнечной активности показана в работах [Rasporov et al., 2007; Распопов и др., 2009] на примере ряда климатических параметров (температура, интенсивность осадков, аэрозольная концентрация), при этом отмечена возможность изменения знака эффектов. Региональная структура (области положительных и отрицательных вариаций температуры) выявлена также при моделировании температурного отклика на долговременные изменения солнечной инсоляции [Waple et al., 2002].

Рассмотрим временные вариации эффектов ГКЛ в зональном давлении. На рисунке 2а представлен временной ход коэффициентов корреляции для 11-летних скользящих интервалов  $R(GPH700(\varphi), NM)$  между среднегодовыми значениями зонального (осредненного вдоль географической широты  $\varphi$ ) давления  $GPH700(\varphi)$  и скоростью счета нейтронного монитора в Клаймаксе  $NM$ . На рисунке 2б приведен также временной ход скользящих 11-летних коэффициентов корреляции для значений  $GPH700$ , осредненных по отдельным широтным поясам. Данные, представленные на рис. 2, свидетельствуют о наличии долговременных изменений в характере корреляций между давлением тропосферы на разных широтах и потоками ГКЛ. Отчетливо видно, что до начала 1980-х гг. в северной высокоширотной области ( $\varphi > 60^\circ N$ ), а также на низких широтах ( $\varphi = 30^\circ S - 30^\circ N$ ) имела место отрицательная корреляция зонального давления с потоками ГКЛ. В то же время положительная корреляция наблюдалась в умеренных широтах северного полушария ( $\varphi = 40 - 60^\circ N$ ), а также в умеренных и высоких широтах южного полушария ( $\varphi > 50^\circ S$ ). В начале 1980-х гг. произошло изменение знака эффектов ГКЛ. С начала 1980-х до конца 1990-х гг. положительная корреляция давления с потоками ГКЛ наблюдалась уже в высоких широтах северного полушария и на низких широтах ( $\varphi = 30^\circ S - 30^\circ N$ ), тогда как отрицательная — в умеренных широтах обоих полушарий и над южной высокоширотной областью.

Таким образом, временной ход коэффициентов корреляции между зональным давлением на

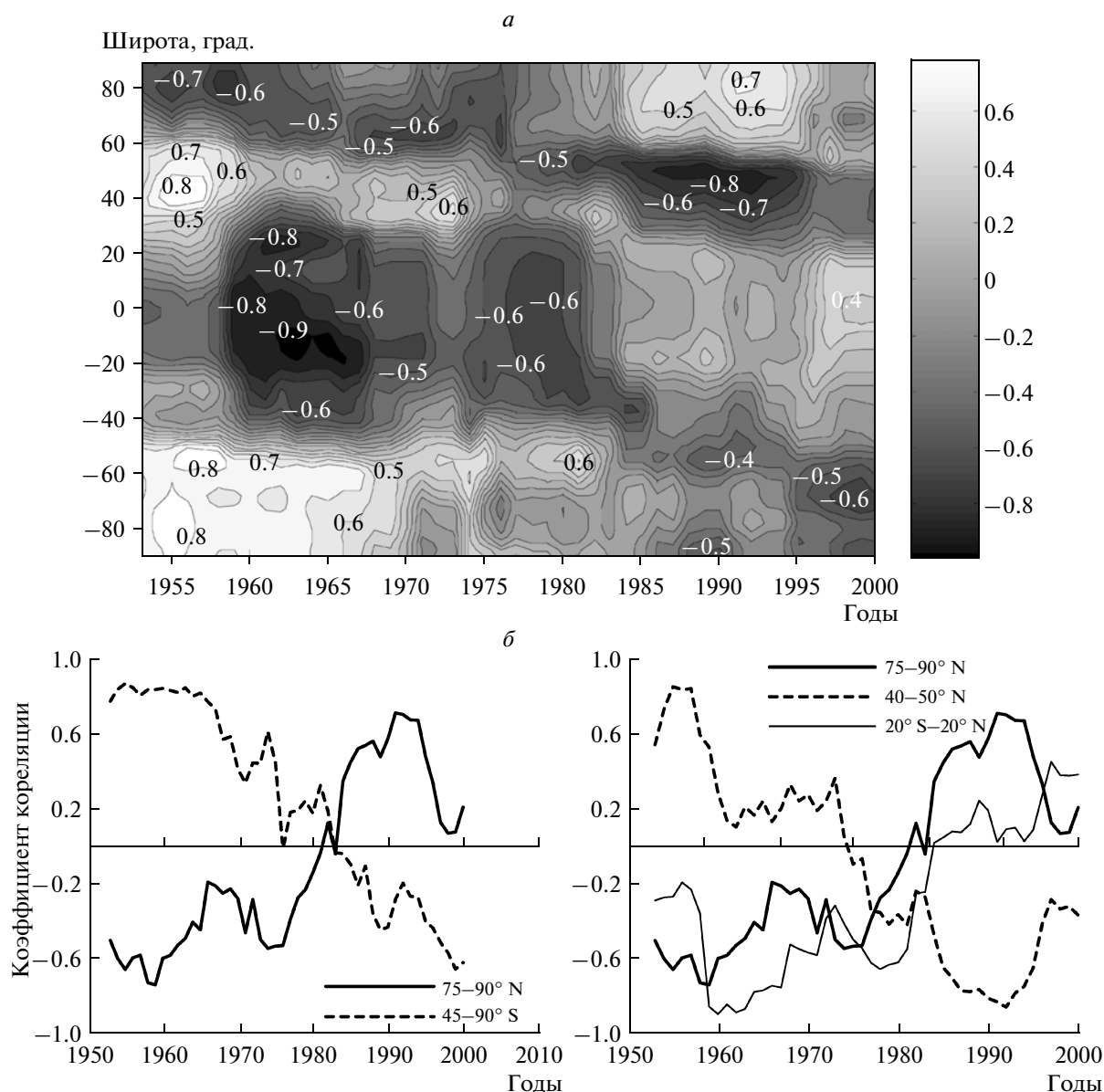
разных широтах и потоками ГКЛ обнаруживает ряд закономерностей. Следует отметить противоположный характер отклика атмосферного давления на вариации ГКЛ в высокоширотных областях северного и южного полушарий. Также наблюдается обратная связь изменений давления в высоких широтах ( $\varphi > 60^\circ N$ ) и над областью циклогенеза в умеренных широтах ( $\varphi = 40 - 60^\circ N$ ) северного полушария. Изменения давления в районе экваториальной ложбины совпадают по знаку с изменениями давления над северной полярной областью и противоположны по знаку изменениям давления над южной.

Таким образом, можно сделать вывод, что возмущения циркуляции, коррелирующие с вариациями потока ГКЛ, охватывают всю земную атмосферу. При этом процессы, развивающиеся в различных широтных поясах и регионах, тесно связаны между собой. Изменение знака эффектов ГКЛ произошло в начале 1980-х гг. практически одновременно во всех широтных поясах. Данные, приведенные на рис. 2, предполагают также наличие долгопериодных изменений амплитуды и знака эффектов ГКЛ в атмосферной циркуляции.

## 2.2 Эффекты солнечной активности в вариациях приземного давления по данным архива MSLP

Рассмотрим изменения давления, которые могут быть обусловлены солнечной активностью и соответствующими вариациями потоков ГКЛ, на более длительной временной шкале. В качестве исходного материала для этой цели использовались данные архива приземного атмосферного давления MSLP (Mean Sea Level Pressure, Climatic Research Unit, UK) за период 1873–2000 гг. [<ftp://ftp.cru.uea.ac.uk>]. Данные архива представляют собой среднемесячные значения приземного атмосферного давления ( $SP$ ) в узлах регулярной сетки  $5^\circ \times 10^\circ$  в северном полушарии в диапазоне широт  $15 - 85^\circ N$ . Для характеристики солнечной активности использовались среднегодовые значения чисел Вольфа  $W$  [[ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SUNSPOT\\_NUMBERS/](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/)].

На рисунке 3 представлены коэффициенты корреляции  $R(SP(\varphi), W)$  по скользящим 11-летним интервалам между среднегодовыми значениями зонального давления  $SP(\varphi)$  и числами Вольфа. Очевидно, что в силу обратной зависимости между интенсивностью ГКЛ и числом солнечных пятен, коэффициенты корреляции на рис. 3 противоположны по знаку коэффициентам корреляции  $R(GPH700(\varphi), NM)$  на рис. 2. Тем не менее, можно видеть, что изменения давления, наблюдаемые в связи с СА/ГКЛ в высоких широтах (области формирования арктических антициклонов), меняют знак при переходе к умеренным



**Рис. 2.** *a* – Временной ход скользящих 11-летних коэффициентов корреляции между среднегодовыми значениями зональных высот изобарического уровня 700 гПа  $GPH700(\varphi)$  и интенсивностью потока ГКЛ; *b* – то же для значений  $GPH700$ , осредненных по отдельным широтным поясам.

широтам (области внутропического циклогенеза). Таким образом, характерные особенности пространственного распределения коэффициентов корреляции между давлением в тропосфере высоких и умеренных широт и потоками ГКЛ, наблюдаемые для периода 1948–2005 гг., сохраняются и на вековой шкале.

Использование архива MSLP и ряда чисел Вольфа позволяет более детально исследовать временную структуру эффектов СА/ГКЛ в умеренных и высоких широтах. Данные, приведенные на рис. 3 и 4*a*, показывают, что в области полярных и субполярных широт коэффициенты

корреляции между давлением и числом солнечных пятен испытывают четко выраженные колебания с максимумами в 1910-х и 1960–1970-х гг., что предполагает периодичность ~60 лет. Смена знака коэффициентов корреляции наблюдается в 1890–1900-х, начале 1920-х, 1940–1950-х, а также в начале 1980-х гг. Приведенные данные свидетельствуют о наличии долговременных вариаций эффектов СА/ГКЛ в циркуляции нижней атмосферы, что подтверждается результатами спектрального анализа (рис. 4*b*). Действительно, спектры Фурье коэффициентов корреляции между давлением в области широт  $\geq 60^\circ$  N и числами

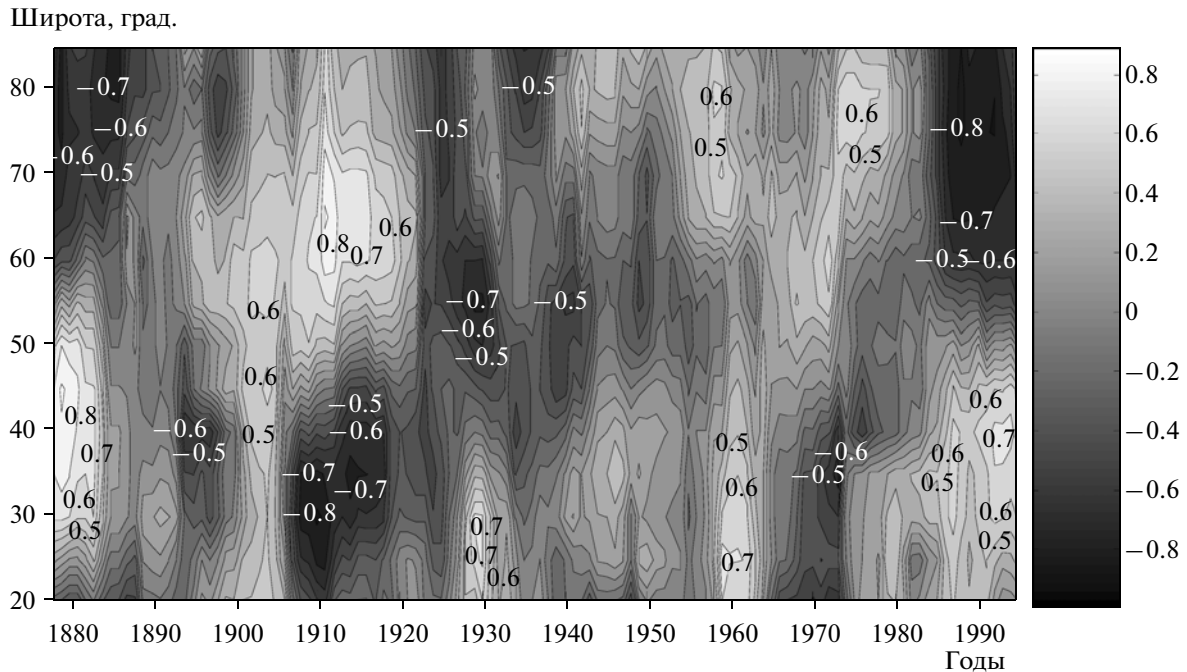


Рис. 3. Временной ход скользящих 11-летних коэффициентов корреляции  $R(SP(\varphi), W)$  между среднегодовыми значениями зонального давления  $SP(\varphi)$  и числами Вольфа.

Вольфа обнаруживают доминирующую гармонику с периодом  $\sim 64$  года. Значимость указанной гармоники составляет 0.95 согласно оценкам относительно спектра “красного” шума при помощи  $\chi^2$  статистики [см., например, Torrence and Compo, 1998].

Исследование показало, что  $\sim 60$ -летняя периодичность в колебаниях коэффициентов корреляции зонального давления с числами Вольфа остается доминирующей в широтном диапазоне  $50\text{--}85^\circ \text{N}$ . Однако в умеренных широтах  $40\text{--}45^\circ \text{N}$  (области внетропического циклогенеза) указанная периодичность ослабевает, и в спектрах коэффициентов корреляции усиливаются гармоники с периодом  $\sim 22$  лет (рис. 4б). В субтропических широтах  $30\text{--}35^\circ \text{N}$  гармоника с периодом  $\sim 60$  лет снова становится доминирующей.

Таким образом, результаты данного исследования подтверждают наличие долговременных изменений характера солнечно-атмосферных связей. В зависимости от временного периода эффекты вариаций СА/ГКЛ в тропосферной циркуляции могут усиливаться, ослабевать и даже менять знак. Важной особенностью является  $\sim 60$ -летняя периодичность, наблюдаемая во временном ходе коэффициентов корреляции между давлением и числами Вольфа практически на всех широтах. Наличие четко выраженной периодичности свидетельствует о том, что обнаруженные изменения амплитуды и знака эффектов

СА/ГКЛ неслучайны и обусловлены некоторым физическим механизмом.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тот факт, что эффекты ГКЛ наблюдаются по всему земному шару, обнаруживая при этом региональную зависимость, свидетельствует о том, что возмущение циркуляции охватывает всю земную тропосферу, по-разному проявляясь в конкретных условиях того или иного региона. Полученные результаты согласуются с данными работы [Веретененко и Пудовкин, 1993], где было показано, что вариации интенсивности космических лучей приводят к возмущениям крупномасштабной циркуляции атмосферы.

Поскольку атмосфера выступает как единое целое, все части которой взаимодействуют друг с другом, процессы, развивающиеся в отдельных регионах в ответ на те или иные проявления солнечной активности, должны быть тесно связаны между собой. Чтобы понять причины наблюдаемых особенностей пространственно-временной структуры эффектов СА/ГКЛ в тропосферном давлении, рассмотрим основные элементы крупномасштабной атмосферной циркуляции.

Известно, что основными элементами макроциркуляции атмосферы в высоких и умеренных широтах северного полушария являются циркумполярный вихрь, планетарная высотная фронтальная зона, фронтальные циклоны и антициклоны.

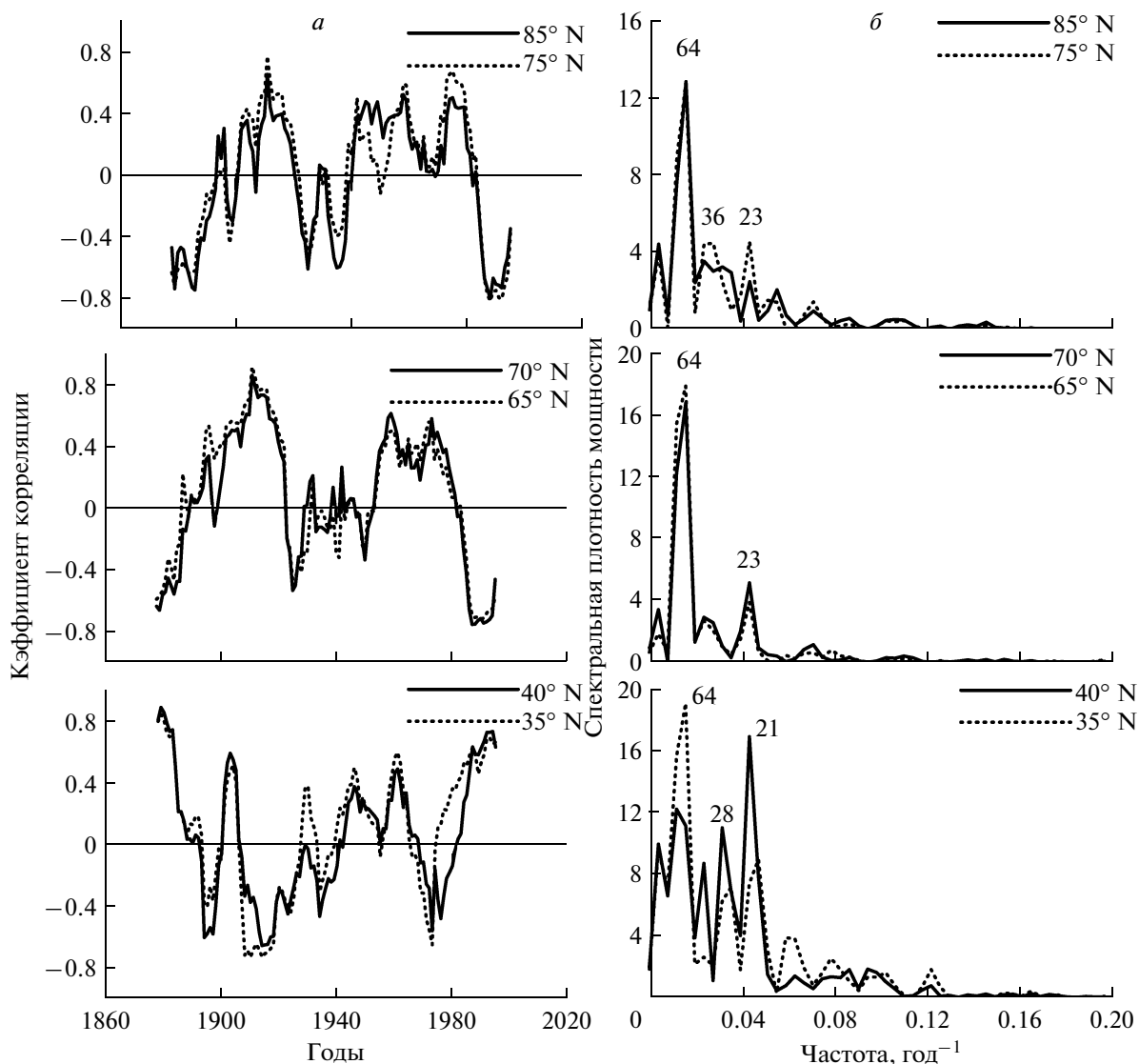


Рис. 4. *a* – Временной ход скользящих 11-летних коэффициентов корреляции  $R(SP(\varphi), W)$  между среднегодовыми значениями зонального приземного давления  $SP(\varphi)$  на отдельных широтах и числами Вольфа; *б* – спектры Фурье коэффициентов корреляции  $R(SP(\varphi), W)$ .

лоны. Циркумполярный вихрь (ЦПВ) представляет собой циклоническую циркуляцию с центром в районе полюсов, которая охватывает среднюю и верхнюю тропосферу и стратосферу. Охлаждение воздуха в полярной области способствует росту давления у поверхности Земли (формированию приземного антициклона). Одновременно с ростом приземного давления происходит опускание изобарических поверхностей и формирование области пониженного давления на высотах 500 гПа и выше – центра вихря [Гирс, 1974]. Центр ЦПВ обычно расположен над Канадой, но иногда появляется второй центр над восточной Сибирью.

Другим важным элементом макроциркуляции атмосферы является планетарная высотная фронтальная зона – система высотных фронталь-

ных зон (областей высоких контрастов температуры), опоясывающая все полушарие или большую его часть. Во фронтальных зонах сконцентрирована значительная часть энергии атмосферной циркуляции. С фронтальными зонами связаны струйные течения – сильные воздушные потоки в верхней тропосфере и стратосфере. В нижней части фронтальных зон формируются атмосферные фронты – узкие переходные области между холодными и теплыми воздушными массами, характеризующиеся большими горизонтальными градиентами температуры.

С высотными фронтальными зонами и соответствующими фронтами тесно связаны процессы внетропического циклогенеза. Подавляющая часть циклонов умеренных широт формируется

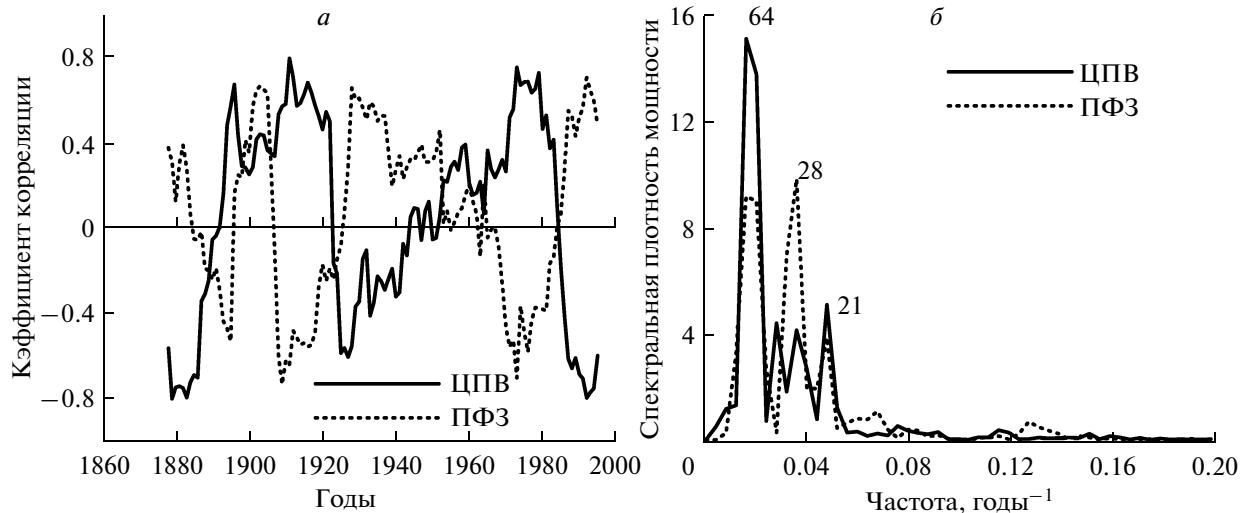


Рис. 5. *a* – Временной ход скользящих 11-летних коэффициентов корреляции  $R(SP, W)$  между среднегодовыми значениями приземного давления в областях формирования арктического циркумполярного вихря и полярной фронтальной зоны в Северной Атлантике и числами Вольфа; *б* – спектры Фурье коэффициентов корреляции  $R(SP, W)$ .

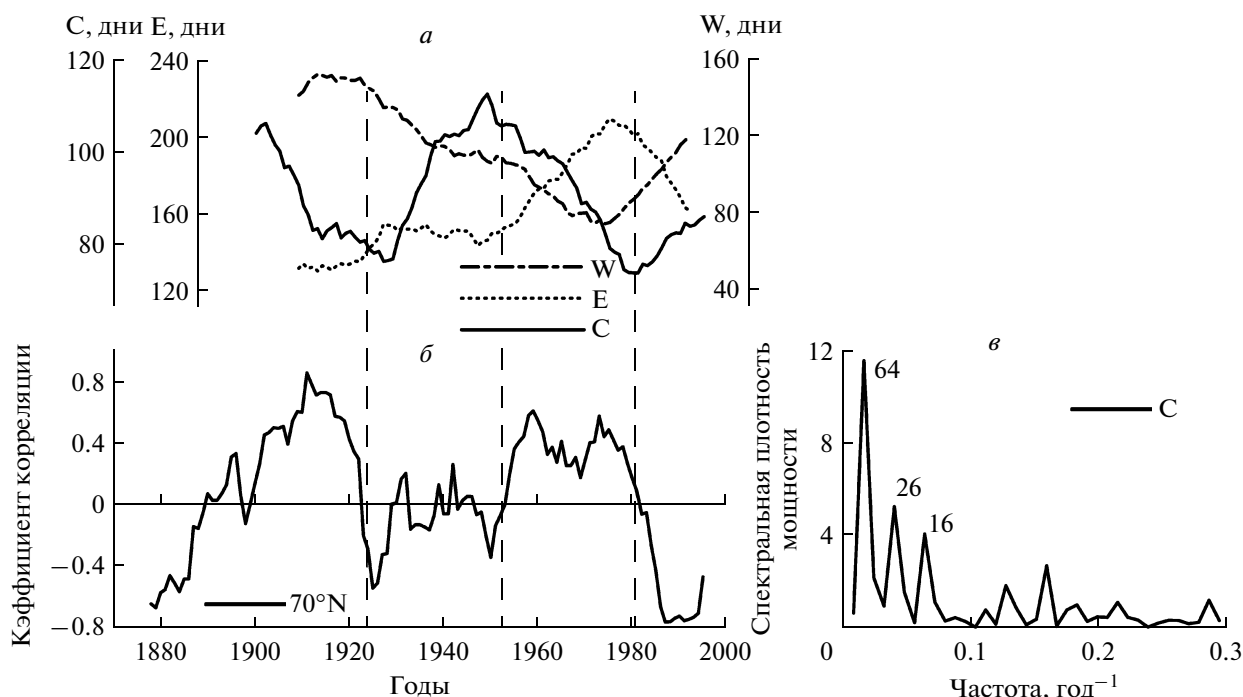
либо на полярных фронтах, разделяющих воздух умеренных широт от более теплого тропического воздуха, либо на арктических фронтах, разделяющих холодный арктический воздух и воздух умеренных широт. Это обусловлено наличием высоких температурных контрастов во фронтальных зонах, создающих условия для адвекции холода, которая способствует интенсификации циклонического вихря и является энергетической основой для его развития [Воробьев, 1991]. В результате циклонической деятельности происходит обмен воздушными массами между высокими и низкими широтами, что приводит к уменьшению меридиональных градиентов температуры. Таким образом, развитие внутротропических циклонов способствует уменьшению избыточных контрастов температуры (потенциальной энергии), сконцентрированных во фронтальных зонах.

Рассмотрим вариации среднегодовых значений давления в областях формирования центра арктического ЦПВ над Канадой-Гренландией ( $60-85^{\circ} \text{ N}$ ,  $220-350^{\circ} \text{ E}$ ) и полярной фронтальной зоны (ПФЗ) у восточных берегов Северной Америки ( $25-40^{\circ} \text{ N}$ ,  $280-300^{\circ} \text{ E}$ ). ПФЗ является частью планетарной высотной фронтальной зоны и, соответственно, областью интенсивного внутротропического циклогенеза. На рисунке 5 представлен временной ход коэффициентов корреляции  $R(SP, W)$  по 11-летним скользящим интервалам между среднегодовыми значениями приземного давления в указанных регионах и числами Вольфа. Сопоставление данных на рис. 4 и 5 показывает, что эффекты СА/ГКЛ в региональном давлении выражены более отчетливо, чем в зональном. Коэффициенты корреляции давления с числами Вольфа достигают больших абсо-

лютных величин в областях формирования ЦПВ и ПФЗ. При этом ~60-летняя периодичность во временном ходе региональных коэффициентов корреляции более четко выражена по сравнению с зональными. Согласно данным спектрального анализа, гармоника с периодом ~64 года (значимость более 0.95) является доминирующей в спектре колебаний коэффициентов корреляции для области формирования ЦПВ (рис. 5б). В области полярной фронтальной зоны в Северной Атлантике эта гармоника также остается достаточно мощной, несмотря на усиление колебаний с периодом ~28 лет. Таким образом, изменения зонального давления в высоких и умеренных широтах, наблюдаемые в связи с вариациями СА/ГКЛ, в значительной степени определяются изменениями давления в областях формирования основных элементов макроциркуляции.

Следует отметить, что эффекты СА/ГКЛ в атмосферном давлении в областях формирования ЦПВ и североатлантической ПФЗ, находятся, как правило, в противофазе (некоторое нарушение данной закономерности в конце XIX-го–начале XX-го вв. может быть обусловлено недостаточно высоким качеством данных для указанного периода). В целом же данные на рис. 5 показывают, что рост давления в области формирования ЦПВ (усиление арктического антициклона) при увеличении чисел Вольфа происходит одновременно с понижением давления (усилением циклогенеза) в области североатлантической ПФЗ. И наоборот, ослабление антициклонов в Арктике при увеличении чисел Вольфа сопровождается ослаблением циклогенеза у берегов Северной Америки. Полученные результаты свидетельствуют о том, что процессы, развивающиеся в связи с вариациями





**Рис. 6.** *a* – Долгопериодные изменения повторяемости основных форм циркуляции W, E и C (20-летние скользящие средние); *б* – временной ход скользящих 11-летних коэффициентов корреляции зонального приземного давления на широте 70° N с числами Вольфа; *в* – спектр Фурье повторяемости меридиональной формы циркуляции C. Вертикальные штриховые линии показывают моменты обращения знака коэффициентов корреляции.

СА/ГКЛ в области циркумполярного вихря и в области наиболее интенсивного внетропического циклогенеза, тесно связаны между собой.

Таким образом, эффекты СА/ГКЛ в вариациях давления наиболее четко выражены в районах формирования основных элементов крупномасштабной циркуляции атмосферы. Изменения давления в указанных регионах дают основной вклад в изменения зонального давления. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что пространственная структура изменений давления в связи с вариациями СА/ГКЛ определяется их влиянием на основные элементы крупномасштабной циркуляции (циркумполярный вихрь, планетарную фронтальную зону, внетропические циклоны и антициклоны).

Следует отметить, что ключевую роль при этом играют, по-видимому, процессы в высоких широтах. В связи с низким порогом геомагнитного обрезания в полярной области высыпаются частицы в широком диапазоне энергий и наблюдаются более высокие значения скорости ионизации по сравнению со средними и низкими широтами [Bazilevskaya et al., 2008]. Вариации потоков ГКЛ в 11-летнем цикле наиболее выражены в стратосфере на высотах ~15–25 км, т.е., в области формирования циркумполярного вихря. В нижней части ЦПВ на высотах ~10–20 км наблюдаются наибольшие значения скорости ионизации за

счет потоков ГКЛ [Bazilevskaya et al., 2008]. Таким образом, можно предположить, что важную роль в механизме солнечно-атмосферных связей играет влияние вариаций ГКЛ на состояние циркумполярного вихря, что в свою очередь оказывает влияние на развитие динамических процессов на более низких широтах. Интенсификация циркумполярного вихря способствует росту градиентов температуры на его границах, что, по-видимому, может усиливать контрасты температуры во фронтальных зонах и, соответственно, интенсивность циклогенеза в умеренных широтах.

Рассмотрим возможные причины долгопериодных колебаний амплитуды и знака эффектов вариаций СА/ГКЛ. Прежде всего, можно предположить, что наблюдаемые изменения характера эффектов обусловлены причинами, связанными с состоянием самой атмосферы. Действительно, анализ долгопериодных изменений повторяемости основных форм макроциркуляции атмосферы согласно классификации Вангенгейма-Гирса [Вангенгейм, 1952; Гирс, 1974] выявил ряд интересных особенностей в периоды смены знака эффектов СА/ГКЛ. На рисунке 6*a* показаны 20-летние скользящие средние повторяемости (числа дней в году с тем или иным типом циркуляции) для W (западной), E (восточной) и C (меридиональной) форм циркуляции. Главной особенностью западной (зональной) формы W является развитие

западно-восточного переноса, при котором в поле давления наблюдаются волны малой амплитуды, быстро смещающиеся с запада на восток. Формы С и Е характеризуют развитие меридиональной циркуляции атмосферы, когда в поле давления формируются стационарные или медленно перемещающиеся волны большой амплитуды (указанные формы различаются расположением ложбин и гребней). Согласно данным на рис. 6а, с конца 1970-х гг. наблюдается увеличение повторяемости зональной формы циркуляции W, тогда как повторяемость восточной формы Е начала резко уменьшаться, а меридиональной формы С — увеличиваться. Таким образом, смену знака эффектов СА/ГКЛ в вариациях атмосферного давления в начале 1980-х гг., по всей видимости, можно связать с преобразованиями эпох крупномасштабной циркуляции атмосферы.

Для предыдущих моментов обращения знака эффектов СА/ГКЛ аналогичных одновременных изменений в частоте повторяемости основных типов циркуляции не наблюдается. Тем не менее, сопоставление данных на рис. 6а показывает, что периоды отрицательной корреляции давления в полярной области с числами Вольфа (положительной корреляции с ГКЛ) совпадают с периодами усиления меридиональной формы С. И, наоборот, положительная корреляция давления с числами Вольфа (отрицательная корреляция с ГКЛ) наблюдается в периоды уменьшения повторяемости формы С. Кроме того, в спектре частоты повторяемости данной формы циркуляции (рис. 6в) также обнаруживается доминирующая гармоника с периодом ~64 года (значимость более 0.95), наблюдаемая в спектрах коэффициентов корреляции с числами Вольфа зонального и регионального давления. Это подтверждает предположение о возможной связи изменений амплитуды и знака эффектов СА/ГКЛ с эволюцией основных форм крупномасштабной циркуляции. Данные на рис. 6 позволяют предположить, что вариации СА/ГКЛ способствуют в первую очередь развитию в атмосфере меридиональных процессов типа С по Вангенгейму-Гирсу.

Таким образом, в периоды роста повторяемости меридиональной формы С (1920—1950 гг. и 1980 — настоящее время) при увеличении потока ГКЛ наблюдается интенсификация процессов циклогенеза в умеренных широтах (рис. 1а). В результате мы наблюдаем отрицательную корреляцию давления с потоками ГКЛ (понижение давления) в районах наиболее интенсивного формирования и развития внетропических циклонов (как правило, на полярных фронтах у восточных берегов материков и над океанами). Усиление циклонической активности приводит к усилению междуширотного обмена воздушными массами. Более интенсивное поступление теплого воздуха в высокие широты и его охлаждение способствует

росту давления и формированию арктических антициклонов [Гирс, 1974]. Вследствие этого в полярной области наблюдается положительная корреляция давления с потоками ГКЛ. Положительная корреляция наблюдается также на низких широтах, где росту давления способствует, по-видимому, увеличение притока более холодного воздуха из высоких и умеренных широт.

В периоды ослабления меридиональной циркуляции (1900—1920 гг. и 1950—1980 гг.) эффекты ГКЛ в циклонической активности практически отсутствуют (рис. 1б), на полярных фронтах наблюдается слабая положительная корреляция давления с интенсивностью ГКЛ (ослабление циклогенеза). При этом междуширотный воздухо- и теплообмен уменьшается и, по-видимому, это приводит к понижению давления в полярной области (ослаблению арктического антициклогенеза) и в экваториальной ложбине. В результате пространственное распределение коэффициентов корреляции давления с потоками ГКЛ противоположно наблюдаемому в периоды развивающейся меридиональной циркуляции.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что обнаруженная ~60-летняя периодичность в эффектах СА/ГКЛ связана с собственными (внутренними) долгопериодными колебаниями крупномасштабной циркуляции атмосферы, при этом солнечная активность и вариации ГКЛ усиливают развивающиеся в атмосфере меридиональные процессы. Данное предположение согласуется с выводами работы [Распопов и Дергачев, 2009] об усилении внутренних колебаний в системе “атмосфера—океан” внешним солнечным сигналом, выступающим в роли синхронизатора атмосферных периодичностей. Важную роль при этом играет, по-видимому, состояние циркумполярного вихря. Согласно работе [Гудкович и др., 2009] в приземных температурах Арктики наблюдается ~60-летний цикл (чередование теплых и холодных эпох), связанный с состоянием вихря. Теплые эпохи соответствуют периодам усиления вихря, холодные — периодам ослабления. При этом переходы между указанными эпохами хорошо совпадают с периодами изменения знака корреляций, обнаруженных в данной работе. Таким образом, преобразования эпох макроциркуляции, являющиеся возможной причиной временной изменчивости эффектов СА/ГКЛ, могут быть следствием вариаций состояния циркумполярного вихря.

Следует отметить, что механизм влияния СА/ГКЛ на интенсивность циклогенеза в умеренных широтах включает, по-видимому, изменения характеристик фронтальных зон. Известно, что роль циклонической деятельности заключается в поддержании на определенном уровне меридиональных градиентов температуры, возникаю-

щих вследствие неравномерного притока солнечной радиации к подстилающей поверхности [Воробьев, 1991]. Критические значения градиентов температуры достигаются во фронтальных зонах, в нижней части которых происходит развитие атмосферных вихрей. Интенсификация циклонической активности, наблюдаемая при росте потока ГКЛ в периоды усиления меридиональной циркуляции, свидетельствует об увеличении температурных контрастов фронтальных зон. Действительно, колебания градиентов температуры с характерными солнечными периодами ~11 и ~22 лет были обнаружены в арктической фронтальной зоне у берегов Гренландии [Veretenenko et al., 2010]. Там же было предположено, что возможной причиной наблюдаемых эффектов являются вариации уходящего теплового излучения вследствие формирования дополнительной облачности. Тем не менее, результаты данной работы предполагают возможное влияние на температурные контрасты фронтальных зон вариаций состояния циркумполярного вихря. Механизм влияния СА/ГКЛ на развитие ЦПВ может включать изменения радиационно-теплового баланса атмосферы, обусловленные изменением ее прозрачности в видимом и инфракрасном диапазоне [Пудовкин и Распопов, 1992]. Причиной изменений прозрачности могут служить вариации состояния облачности и аэрозольных характеристик (концентрации и размеров аэрозольных частиц) вследствие изменений скорости ионизации в стратосфере и верхней тропосфере, связанных с вариациями СА/ГКЛ.

Следует подчеркнуть, что изменения эпох крупномасштабной циркуляции (рис. 6а), которые оказывают влияние на характер эффектов СА/ГКЛ в вариациях давления, в свою очередь могут быть связаны с долгопериодными изменениями солнечной и геомагнитной активности [Гирс, 1974; Georgieva et al., 2007]. Действительно, смена эпох циркуляции и знака эффектов ГКЛ на рубеже 70-х–80-х гг. совпала по времени с рядом событий на Солнце. В частности, в этот период изменился характер северо-южной асимметрии активности 11-летних солнечных циклов: доминирование северного полушария сменилось на доминирование южного [Наговицын, 1998]. Согласно данным Обридо и Шелтинг [2009], рост магнитного момента солнечного диполя, наблюдавшийся с 1915 г. по 1976 г., сменился спадом, что привело к систематическому уменьшению напряженности полярного магнитного поля Солнца. Таким образом, наблюдаемые в конце 70-х–начале 80-х гг. изменения макроциркуляционного режима атмосферы и соответствующие изменения характера эффектов СА/ГКЛ в атмосферной циркуляции могут быть связаны с крупномасштабными процессами на Солнце. Очевид-

но, что для подтверждения данного предположения необходимы дальнейшие исследования.

В настоящей работе основное внимание было уделено эффектам СА/ГКЛ в области высоких и умеренных широт северного полушария, что обусловлено, прежде всего, ограничениями используемого архива *MSLP*. Макроциркуляционный метод Вангенгейма-Гирса был разработан для обеспечения долгосрочных метеорологических прогнозов также в северном полушарии. Исследование долгопериодных эффектов СА/ГКЛ в южном полушарии представляет отдельную задачу. Тем не менее, следует отметить противоположный характер вариаций давления в северной и южной полярных областях, коррелирующих с потоками ГКЛ. Согласно данным [Mansurov et al., 1974], противоположные по знаку изменения давления наблюдались на станциях в магнито-сопряженных точках при прохождении секторных границ межпланетного магнитного поля (ММП). В работе [Burns et al., 2008] обнаружена положительная корреляция приземного давления с *V*-компонентой ММП на антарктических станциях и отрицательная корреляция – на арктических станциях. Таким образом, возможной причиной северо-южной асимметрии вариаций давления являются противоположные по знаку изменения ионосферного потенциала в связи с вариациями ММП [Tinsley, 2008], что свидетельствует, по-видимому, о существенном вкладе в солнечно-атмосферные связи электрического механизма.

#### 4. ВЫВОДЫ

Результаты данного исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) Возмущения циркуляции, обусловленные вариациями солнечной активности и интенсивности потока ГКЛ, охватывают всю тропосферу, при этом процессы, развивающиеся в различных широтных поясах и регионах, тесно связаны между собой. Эффекты СА/ГКЛ в вариациях давления имеют ярко выраженный широтно-региональный характер. Пространственная структура изменений давления определяется влиянием вариаций СА/ГКЛ на основные элементы крупномасштабной циркуляции атмосферы (циркумполярный вихрь, планетарную фронтальную зону, циклоны и антициклоны).

2) Временная структура эффектов СА/ГКЛ в циркуляции тропосферы высоких и умеренных широт характеризуется ~60-летней периодичностью, которая может быть обусловлена сменами эпох крупномасштабной циркуляции атмосферы. Обнаружены изменения знака корреляции между давлением и числами Вольфа в 1890–1900-х гг., начале 1920-х гг., в 1950-х гг. и в начале 1980-х гг. Определяющую роль в формировании знака эф-

фектов СА/ГКЛ играет, по-видимому, развитие меридиональной циркуляции. Смены эпох макроциркуляции атмосферы, в свою очередь, могут быть связаны с крупномасштабными процессами на Солнце.

3) Механизм влияния СА/ГКЛ на циклоническую активность в умеренных широтах включает, по-видимому, изменения состояния стратосферного циркумполярного вихря, способствующие увеличению температурных контрастов во фронтальных зонах. Возможной причиной вариаций состояния циркумполярного вихря могут быть изменения радиационно-теплового режима атмосферы вследствие вариаций облачности и содержания аэрозоля.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ гранты № 09-02-00083, 10-05-00129 и программы обмена между российской и финской академиями (проект №16). Авторы выражают благодарность Ю.А. Наговицыну (ГАО РАН, С.-Петербург) и В.В. Иванову (Арктический и Антарктический НИИ, С.-Петербург) за полезную дискуссию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Авдюшин С.И., Данилов А.Д.* Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 5. С. 3–14. 2000.
- *Вангенгейм Г.Я.* Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики // Труды Арктического научно-исследовательского института. Т. 34. 314 с. 1952.
- *Веретененко С.В., Пудовкин М.И.* Эффекты вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 6. С. 35–40. 1993.
- *Веретененко С.В., Тайл П.* Солнечные протонные события и эволюция циклонов в Северной Атлантике // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 4. С. 542–552. 2008.
- *Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 616 с. 1991.
- *Гирс А.А.* Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 487 с. 1974.
- *Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е.* О характере и причинах изменения климата Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. № 1(81). С. 15–23. 2009.
- *Монин А.С.* Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 184 с. 1969.
- *Наговицын Ю.А.* Северо-южная асимметрия солнечной активности как нелинейный процесс. Короткопериодические и долгопериодические вариации // Изв. ГАО. № 212. С. 145–153. 1998.
- *Обридко В.Н., Шелтинг Б.Д.* Некоторые аномалии эволюции глобальных и крупномасштабных магнитных полей на Солнце как предвестники нескольких предстоящих невысоких циклов // Письма в Астроном. журн. Т. 35. № 4. С. 279–285. 2009.
- *Питток А.Б.* Связь солнечных циклов и погоды – не результат ли удачных опытов самовнушения? В сб.: Солнечно-земные связи, погода и климат. Ред. Б. Мак-Кормак и Т. Селига. М.: Мир, С. 209–221. 1982.
- *Пудовкин М.И., Распопов О.М.* Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 5. С. 1–9. 1992.
- *Распопов О.М., Дергачев В.А.* Различия в физической природе откликов системы атмосфера–океан на воздействие вариаций солнечной активности различного временного масштаба // Тр. Всероссийской ежегодной конф. по физике Солнца “Год астрономии: Солнечная и солнечно-земная физика – 2009”. С.-Петербург. 5–11 июля 2009. Ред. Степанов А.В. С.-Петербург, ГАО РАН. С. 371–376. 2009.
- *Распопов О.М., Дергачев В.А., Козырева О.В., Колстрем Т., Лопатин Е.В., Лукман Б.* География квазидвухсотлетней климатической периодичности и долговременные вариации солнечной активности // Изв. РАН, Сер. географ. № 2. С. 17–27. 2009.
- *Хромов С.П., Петросянци М.А.* Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ, 520 с. 1994.
- *Artamonova I., Veretenenko S.* Galactic cosmic ray variation influence on baric system dynamics at middle latitudes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 73. № 2/3. P. 366–370. 2011.
- *Bazilevskaya G.A., Usoskin I.G., Flückiger E.O. et al.* Cosmic Ray Induced Ion Production in the Atmosphere // Space Sci. Rev. V. 137. № 1–4. P. 149–173. 2008.
- *Burns G.B., Tinsley B.A., French W.J.R., Troshichev O.A., Frank-Kamenetsky A.V.* Atmospheric circuit influences on ground-level pressure in the Antarctic and Arctic // J. Geophys. Res. 113, D15112. doi:10.1029/2007JD009618, 2008.
- *Ebisuzaki W.* A method to estimate the statistical significance of a correlation when the data are serially correlated // J. Climate. V. 10. P. 2147–2153. 1997.
- *Georgieva K., Kirov B., Tonev P., Guineva V., Atanasov D.* Long-term variations in the correlation between NAO and solar activity: The importance of north-south solar activity asymmetry for atmospheric circulation // Adv. Space Res. V. 40. P. 1152–1166. 2007.
- *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. V. 77. P. 437–472. 1996.
- *Mansurov S.M., Mansurova L.G., Mansurov G.S., Mikhnevich V.V., Visotskii A.M.* North-south asymmetry of geomagnetic and tropospheric events // J. Atmos. Terr. Phys. V. 36. P. 1957–1962. 1974.
- *McCracken K.J., Beer J.* Long-term changes in the cosmic ray intensity at Earth, 1498–2005 // J. Geophys. Res. 112, A10101, doi:10.1029/2006JA012117, 2007.

- *Marsh N., Svensmark H.* Cosmic rays, clouds and climate // *Space Sci. Reviews.* V. 94. № 1/2. P. 215–230. 2000.
- *Morozova A.L., Pudovkin M.I., Thejll P.* Variations of atmospheric pressure during solar proton events and Forbush decreases for different latitudinal and synoptic zones // *Int. J. Geomagn. Aeron.* V. 3. № 2. P. 181–189. 2002.
- *Pudovkin M.I.* Influence of solar activity on the lower atmosphere state // *Int. J. Geomagn. Aeron.* V. 5. № 2. GI2007. doi:10.1029/2003GI00060, 2004.
- *Pudovkin M.I., Veretenenko S.V.* Variations of the cosmic rays as one of the possible links between the solar activity and the lower atmosphere // *Adv. Space Res.* V. 17. № 11. P. 161–164. 1996.
- *Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kuzmin A.V., Kozyreva O.V., Ogurtsov M.G., Kolström T., Lopatin E.* Regional tropospheric responses to long-term solar activity variations // *Adv. Space Res.* V. 40. № 7. P. 1167–1172. 2007.
- *Tinsley B.A.* The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics // *Rep. on Progress in Physics.* V. 71. № 6. P. 66801–66900. 2008.
- *Tinsley B.A., Deen G.W.* Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: a connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds? // *J. Geophys. Res.* V. 96. P. 22283–22296. 1991.
- *Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analyses // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* V. 79. P. 61–78. 1998.
- *Veretenenko S.V., Dergachev V.A., Dmitriyev P.B.* Solar rhythms in the characteristics of the Arctic frontal zone in the North Atlantic // *Adv. Space Res.* V. 45. P. 391–397. 2010.
- *Waple F.M., Mann M.E., Bradley R.S.* Long-term pattern of solar irradiation forcing in model experiments and proxy based surface temperature reconstruction // *Climate Dynamics.* V. 18. P. 563–578. 2002.