

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ВЕРЕТЕНЕНКО СВЕТЛАНА ВИКТОРОВНА

**ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ
ЭФФЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ВАРИАЦИЙ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
В ЦИРКУЛЯЦИИ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ**

Специальности: 01.03.03 – физика Солнца
25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Диссертация на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет».

Научный консультант:

доктор физико-математических наук,
профессор физического факультета СПбГУ,
Семёнов Владимир Семёнович

Официальные оппоненты:

Наговицын Юрий Анатольевич
доктор физико-математических наук,
зам. директора Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Главная (Пулковская) астрономическая
обсерватория» РАН

Стожков Юрий Иванович
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
«Физический институт им. П.Н. Лебедева» РАН

Смышляев Сергей Павлович
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный
гидрометеорологический университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт земного магнетизма и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова» РАН

Защита состоится «___»_____2017 года в _____ часов на заседании совета Д 212.232.35 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» по адресу: Санкт-Петербург, Средний пр-т, В.О., д. 41/43, ауд.304.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им. А.М. Горького СПбГУ и на сайте <http://spbu.ru/science/>.

Автореферат разослан «___»_____2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М. В. Кубышкина

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена проблеме влияния солнечной активности и обусловленных ею вариаций солнечных и галактических космических лучей на циркуляцию нижней атмосферы, погоду и климат. В диссертации рассматриваются особенности пространственно-временной структуры эффектов космических лучей в вариациях давления атмосферы и эволюции циклонической деятельности во внетропических широтах на разных временных шкалах, а также исследуются причины временной изменчивости солнечно-атмосферных связей.

Актуальность

Проблема влияния солнечной активности и связанных с нею возмущений межпланетной среды на состояние нижней атмосферы, погоду и климат является одной из наиболее важных в современной солнечно-земной физике. Данная проблема не ограничивается чисто научными рамками, поскольку климатические изменения оказывают существенное влияние на экономическую и социальную деятельность человека. Знание природы солнечно-атмосферных связей имеет высокую практическую значимость, так как открывает широкие возможности для улучшения погодных и климатических прогнозов.

Особо важное значение вопрос о влиянии солнечной активности на климат Земли приобрел в последние десятилетия в связи с оживленной дискуссией о природе “глобального потепления” – повышения глобальной температуры, наблюдаемого в течение последних полутора столетий (на $0.85^{\circ}\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ за 1880-2012 гг. [IPCC, 2013]). Согласно оценкам МГЭИК (Международной группы экспертов по изменению климата) вклад парниковых газов в повышение глобальной температуры за 1951-2010 гг. находится в диапазоне $0.5\text{--}1.3^{\circ}\text{C}$, тогда как вклад естественных факторов значительно меньше и составляет от -0.1 до 0.1°C [IPCC, 2013]. Следует отметить, что недооценка вклада естественных факторов в глобальные климатические изменения может способствовать принятию ошибочных решений в политической и экономической сферах, что, в свою очередь, может иметь далеко идущие последствия. Таким образом, тщательное изучение различных аспектов солнечно-атмосферных связей необходимо для научно обоснованной оценки относительного вклада антропогенных и естественных факторов в глобальные изменения климата и минимизации возможных ошибок при принятии политических и экономических решений.

Тем не менее, несмотря на большое количество работ, посвященных влиянию солнечной активности (СА) и связанных с нею возмущений межпланетной среды на состояние нижней атмосферы, погоду и климат, вопрос о физическом механизме данного влияния продолжает оставаться открытым, что обусловлено рядом причин. Прежде всего, влияние солнечной активности не ограничивается каким-либо одним фактором, воздействующим на атмосферу. Вариации солнечной активности сопровождаются изменениями потоков полной солнечной радиации (TSI) и радиации в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах длин волн, возмущениями солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, изменениями потоков солнечных (СКЛ) и галактических (ГКЛ) космических лучей, высыпаниями авроральных электронов и электронов из радиационных поясов Земли. Очевидно, что перечисленные солнечно-геофизические факторы различаются по амплитуде и характеру изменений как на

коротких временных шкалах, так и в масштабе 11-летнего солнечного цикла, по величине энергии, вносимой ими в атмосферу Земли, по характеру влияния на атмосферные процессы. Достаточно часто имеет место одновременное воздействие на атмосферу сразу нескольких факторов (особенно в масштабе 11-летнего цикла), что затрудняет выявление вклада каждого отдельного фактора в физический механизм формирования атмосферного отклика.

Серьезную проблему представляет пространственно-временная изменчивость солнечно-атмосферных связей. Реакция атмосферы (вариации давления, температуры, состояния облачности и т.д.) на те или иные проявления солнечной активности может существенно различаться в зависимости от исследуемого региона. Корреляционные связи, наблюдаемые между атмосферными характеристиками и солнечно-геофизическими факторами, оказываются неустойчивыми во времени: они могут усиливаться, ослабевать, менять знак или совсем исчезать в зависимости от временного интервала. Очевидно, что временная неустойчивость солнечно-климатических связей часто служит основанием для сомнений в их реальности.

В этой связи показателен пример корреляционных связей, обнаруженных между нижней облачностью и вариациями галактических космических лучей Маршем и Свенсмарком [Marsh and Svensmark, 2000]. Высокая положительная корреляция между указанными величинами, наблюдавшаяся в период 1983-2000 гг., рассматривалась как экспериментальное свидетельство в пользу физического механизма солнечно-климатических связей, включающего влияние космических лучей на состояние облачности. Тем не менее, нарушение данной корреляции в начале 2000-х гг. поставило под сомнение не только влияние космических лучей на интенсивность микрофизических процессов в облаках, но и их вклад в физический механизм солнечно-климатических связей. В связи с этим исследование эффектов космических лучей в циркуляции нижней атмосферы и погодно-климатических характеристиках, которое позволило бы оценить реальную роль космических лучей как одного из связующих звеньев между солнечной активностью и нижней атмосферой, приобретает особую актуальность.

Таким образом, для формирования четкого представления о механизме влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы, погоду и климат и создания физико-математической модели данного влияния необходимо всестороннее изучение характера и причин пространственно-временной структуры отклика атмосферы на явления, обусловленные солнечной активностью. Результаты настоящего исследования позволяют улучшить понимание некоторых аспектов данного механизма, а также могут служить экспериментальной базой для построения физико-математических моделей солнечно-атмосферных связей и прогностических моделей изменения климата.

Цели и задачи

Целью данной работы является исследование характера и причин пространственно-временной структуры эффектов космических лучей в вариациях давления атмосферы и эволюции циклонической деятельности во внетропических широтах на разных временных шкалах. Особое внимание уделяется установлению причин временной изменчивости корреляционных связей, наблюдаемых между атмосферными характеристиками (давлением, состоянием нижней облачности) и гелиогеофизическими индексами на мультидекадной шкале.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1) Провести всестороннее исследование эффектов коротковременных вариаций космических лучей (солнечных протонных событий, Форбуш-понижений галактических космических лучей) в вариациях давления атмосферы и дать интерпретацию наблюдаемых эффектов с точки зрения эволюции внетропических барических систем. Определить области наиболее значимых эффектов космических лучей и исследовать особенности этих областей.

2) Исследовать пространственную структуру эффектов галактических космических лучей в вариациях давления в масштабе 11-летнего цикла солнечной активности. Выявить роль основных элементов крупномасштабной циркуляции атмосферы в формировании пространственного распределения вариаций давления, обусловленных вариациями ГКЛ.

3) Исследовать временную изменчивость корреляционных связей между атмосферными характеристиками и вариациями СА/ГКЛ. Выявить периодичности во временном ходе коэффициентов корреляции между давлением атмосферы и характеристиками солнечной активности на мультидекадной временной шкале.

4) Исследовать долговременные изменения эволюции циркумполярного вихря как возможной причины изменчивости солнечно-атмосферных связей на мультидекадной шкале.

Основные положения, выносимые на защиту

1) Наиболее статистически значимые эффекты вариаций космических лучей (КЛ) в эволюции барических систем наблюдаются в североатлантическом регионе, где имеют место низкие пороги геомагнитного обрезания, допускающие высыпание частиц с минимальными энергиями от ~ 100 МэВ до $\sim 2-3$ ГэВ. В зависимости от энергии высыпающихся частиц происходит активизация атмосферных процессов на высокоширотных арктических фронтах или на полярных фронтах умеренных широт.

2) Солнечные протонные события (СПС) с энергиями частиц, достаточными для проникновения в стратосферу ($E > 90$ МэВ), сопровождаются понижением давления над Северной Атлантикой вследствие интенсификации вторичного углубления (регенерации) циклонов в районе юго-восточного побережья Гренландии (области формирования арктических фронтов).

3) Форбуш-понижения галактических космических лучей сопровождаются повышением давления над восточной частью Северной Атлантики, Скандинавией и Европейской территорией России, обусловленным более интенсивным формированием блокирующих антициклонов на полярных фронтах умеренных широт.

4) Северная Атлантика является особым регионом для формирования эффектов вариаций КЛ на коротких временных шкалах (порядка нескольких суток). Структура термобарического поля, благоприятная для развития циклонов у побережья Гренландии (высокие контрасты температуры, расходимость изогипс над океаном) и антициклонов в восточной части Северной Атлантики (прогретость атмосферы над теплым Северо-Атлантическим течением, сходимостью изогипс над континентом) сочетается с низкими порогами геомагнитного обрезания, допускающими высыпания космических частиц, в наибольшей степени модулируемых солнечной активностью.

5) Пространственная структура вариаций давления, наблюдаемая в связи с изменениями потока ГКЛ в 11-летнем цикле солнечной активности, определяется климатическим положением главных атмосферных фронтов. Наиболее значимые коэффициенты корреляции атмосферного давления и интенсивности ГКЛ имеют место на полярных фронтах умеренных широт и в высокоширотной области, ограниченной арктическими фронтами. В северном полушарии эффекты ГКЛ в высокоширотной области и на полярных фронтах имеют противоположный знак.

6) Временная структура эффектов СА/ГКЛ в вариациях давления тропосферы высоких и умеренных широт характеризуется четко выраженной ~60-летней периодичностью. Обращения знака корреляции между приземным давлением во внетропических широтах и числом солнечных пятен обнаружены в 1890-х гг., начале 1920-х гг., в 1950-х гг., а также в начале 1980-х и 2000-х гг.

7) Изменения характера корреляционных связей между динамическими процессами в нижней атмосфере и характеристиками СА/ГКЛ связаны с изменениями крупномасштабной циркуляции атмосферы, обусловленными эволюцией стратосферного циркумполярного вихря. Выявлена ~60-летняя периодичность в вариациях интенсивности циркумполярного вихря. Показано, что усиление циклонических процессов на полярных фронтах умеренных широт имеет место только при сильном вихре. Показана роль эволюции циркумполярного вихря как вероятной причины временной изменчивости солнечно-атмосферных связей.

8) Корреляционные связи, наблюдаемые между облачностью и потоками ГКЛ в умеренных широтах в масштабе 11-летнего солнечного цикла, обусловлены влиянием ГКЛ на развитие циклонической деятельности. Положительная корреляция нижней облачности и потоков ГКЛ в период 1983-2000 гг. объясняется усилением циклогенеза при росте интенсивности ГКЛ, имеющим место при сильном циркумполярном вихре. Нарушение корреляции между облачностью и потоками ГКЛ в начале 2000-х гг. произошло в результате резкого ослабления циркумполярных вихрей обоих полушарий, что привело к изменению эффектов ГКЛ в вариациях внетропического циклогенеза.

Научная новизна

1) Показана важность изменений скорости ионизации в связи с вариациями КЛ для эволюции внетропических барических образований. Увеличение скорости ионизации в ходе СПС способствует интенсификации циклонических процессов, уменьшение скорости ионизации в ходе Форбуш-понижений ГКЛ – антициклонических.

2) Обнаружено, что в зависимости от энергии космических частиц имеет место изменения циклонической деятельности на арктических фронтах высоких широт или полярных фронтах умеренных широт. Высыпания солнечных протонов с энергиями ~100 МэВ в высоких широтах приводит к активизации атмосферных процессов на арктических фронтах, вариации более энергичных галактических космических лучей – на полярных фронтах.

3) Впервые применен синоптический анализ для интерпретации вариаций метеорологических характеристик, наблюдаемых в связи с явлениями солнечной активности.

4) Дано объяснение особой роли североатлантического региона для формирования коротковременных эффектов вариаций КЛ в эволюции внетропических барических систем как

области, где сочетаются благоприятные атмосферные условия (особенности структуры термобарического поля) и геофизические условия (низкие пороги геомагнитного обрезания заряженных космических частиц).

5) Впервые показано, что пространственная структура изменений давления, коррелирующих с вариациями ГКЛ, определяется климатическим положением главных атмосферных фронтов.

6) Выявлена ~60-летняя периодичность во временном ходе коэффициентов корреляции между давлением нижней атмосферы и характеристиками солнечной активности и в эволюции стратосферного циркумполярного вихря. Показано, что изменения знака эффектов СА/ГКЛ в вариациях атмосферного давления происходят при изменениях состояния вихря

7) Показано, что наиболее благоприятные условия для эффектов вариаций ГКЛ в интенсивности внетропического циклогенеза имеют место при сильном циркумполярном вихре.

8) Дано объяснение нарушению корреляции между количеством нижней облачности и потоками ГКЛ в начале 2000-х гг. Показано, что данное нарушение обусловлено резким ослаблением циркумполярных вихрей.

9) Показана роль эволюции стратосферного циркумполярного вихря как вероятной причины временной изменчивости солнечно-климатических связей.

Достоверность научных положений

Научные положения, выносимые на защиту, основаны на обработке большого объема экспериментального материала с использованием современных архивов метеорологических и геофизических данных, в том числе:

- архив реанализа NCEP/NCAR,
- архив приземного давления MSLP (Climatic Research Unit, East England University),
- данные аэрологических зондирований (Датский Метеорологический Институт),
- синоптические карты,
- данные аэростатных измерений потоков космических частиц в стратосфере (ФИАН),
- данные Международного спутникового проекта по климатологии облачности ISCCP.

Достоверность полученных результатов обеспечивается высоким уровнем статистической значимости, которая оценивалась на основе современных математических методов, позволяющих устранить влияние серийной корреляции в исследуемых рядах, в том числе статистического моделирования по методу Монте-Карло. О достоверности и научной значимости результатов, представленных в диссертации, свидетельствуют публикации в рецензируемых российских и зарубежных журналах по солнечно-атмосферной тематике, доклады на крупных российских и международных конференциях.

Научная и практическая значимость

Результаты проведенного исследования важны для понимания физического механизма влияния солнечной активности на циркуляцию нижней атмосферы, погоду и климат. В частности, полученные результаты позволяют объяснить региональный характер наблюдаемых изменений метеорологических характеристик в связи с вариациями космических лучей на разных временных шкалах, а также временную изменчивость солнечно-атмосферных связей.

Результаты исследования могут быть использованы в качестве экспериментальной базы для прогноза погодных и климатических изменений, а также для создания физико-математической модели влияния солнечной активности на циркуляцию нижней атмосферы.

Личный вклад автора

Автору принадлежат идеи, постановка задач, определение методов их решения. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично или под его руководством. Все результаты являются оригинальными.

Апробация работы

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на ряде всероссийских и международных конференций:

1. 30th COSPAR Scientific Assembly, Hamburg, Germany, 11-21 July 1994
2. I International Conference “Problems of Geocosmos”, St.Petersburg, Petrodvorets, 17-23 June 1996
3. 31st COSPAR Scientific Assembly, Birmingham, UK, 14-21 July 1996
4. 8th Scientific Assembly of IAGA with ICMA and STP Symposia. Uppsala, Sweden, 4-15 August 1997
5. “Современные проблемы солнечной цикличности”. Конференция, посвященная памяти М.Н. Гневышева и А.И. Оля. ГАО РАН, Санкт-Петербург, 26-30 мая 1997 г.
6. II International Conference “Problems of Geocosmos”, St.Petersburg, Petrodvorets, 29 June – 3 July 1998
7. EGS XXIV General Assembly , The Hague, Netherlands, 19-23 April 1999
8. 33rd COSPAR Scientific Assembly, Warsaw, Poland, 16-23 July 2000
9. “Активные процессы на Солнце и в звездах”. Научная конференция стран СНГ и Прибалтики. Санкт-Петербург, 1-6 июля 2002 г.
10. 18th European Cosmic Ray Symposium, Moscow, 8-12 July 2002
11. VII Пулковская международная конференция по физике Солнца “Климатические и экологические аспекты солнечной активности”. ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 7-11 июля 2003 г.
12. Y International Conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, 24-28 May 2004
13. 28-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 7-11 июня 2004 г.
14. 35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, France, 18–25 July 2004
15. Всероссийская конференция “Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности”. Троицк, 10-15 октября 2005 г.
16. AGU Fall meeting. San-Francisco, USA, 5-9 December 2005
17. IX Пулковская международная конференция по физике Солнца “Солнечная активность как фактор космической погоды”. ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 4-9 июля 2005 г.
18. YI International Conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Petrodvorets, 23-27 May 2006.
19. 29-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 3-7 августа 2006 г.

20. XI Пулковская международная конференция по физике Солнца “Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений”. ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 2-7 июля 2007 г.
21. 30-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Санкт-Петербург, 2-7 июля 2008 г.
22. VII International Conference “Problems of Geocosmos”. St. Petersburg, Petrodvorets, 23-30 May 2008.
23. 37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, Canada, 13–20 July 2008.
24. Space Climate Symposium III, Saariselka, Finland, 18-21 March 2009.
25. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца “Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика-2009”. ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 6-10 июля 2009 г.
26. Рабочее совещание-дискуссия “Циклы активности на Солнце и звездах”, Москва, ГАИШ МГУ, 18-19 декабря 2009 г.
27. 31-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, МГУ, 5-9 июля 2010 г.
28. 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, 18–25 July 2010.
29. VII International Conference “Problems of Geocosmos”. St.Petersburg, Petrodvorets, 20-24 September 2010.
30. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца, “Солнечная и солнечно-земная физика – 2010”. Санкт-Петербург, ГАО РАН, 4-9 октября 2010 г.
31. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика – 2011”. Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2-8 октября 2011 г.
32. Fourth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Sozopol, Bulgaria, 4-8 June 2012.
33. 23rd European Cosmic Ray Symposium/32-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, 2-7 июля 2012
34. 39th COSPAR Scientific Assembly, Mysore, India, 12–22 July 2012.
35. IX International Conference “Problems of Geocosmos”, St.Petersburg, Petrodvorets, 8-12 October 2012
36. 36th annual seminar “Physics of auroral phenomena”. ПГИ КНЦ РАН, Апатиты, 26 февраля-1 марта 2013 г.
37. 2nd Scientific meeting of TOSCA Working Group 2 “Climate impact of interplanetary and near-Earth conditions and perturbations”, Sunny Beach, Bulgaria, 14-16 May 2013.
38. Fifth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Nessebar, Bulgaria, 3-7 June 2013
39. Space Climate Symposium V, Oulu, Finland, June 15-19, 2013
40. Всероссийская астрономическая конференция “Многоликая Вселенная”, Санкт-Петербург, 23-27 сентября 2013 г.
41. Sixth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Sunny Beach, Bulgaria, 26-30 May 2014
42. 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, 2-11 August 2014
43. 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, 11-15 августа 2014 г.

44. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика–2014”. Санкт-Петербург, ГАО РАН, 20-25 октября 2014 г.
45. X International Conference “Problems of Geocosmos” (St.Petersburg, Petrodvorets, October 6-10, 2014)
46. Seventh Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Sunny Beach, Bulgaria, 1-5 June 2015.
47. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика–2015”. Санкт-Петербург, ГАО РАН, 5-9 октября 2015 г.
48. 11-я ежегодная конференция “Физика плазмы в Солнечной системе”. Москва, 15-16 февраля 2016 г.
49. First VarSITI General Symposium, Albena, Bulgaria, 6-10 June 2016
50. 34-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, 15-19 августа 2016 г.
51. XI International Conference “Problems of Geocosmos” (St.Petersburg, Petrodvorets, October 3-7, 2016)

Работа над диссертацией поддерживалась программами №16, №22, №9 и №7 Президиума РАН, программой ОФН РАН “Плазменные процессы в Солнечной системе” (VI-15), грантами РФФИ для участия в Научных Ассамблеях COSPAR, грантом РФФИ 13-02-00783 “Исследование пространственно-временных характеристик гелиогеофизических эффектов в атмосферной циркуляции”.

Под руководством автора защищена кандидатская диссертация на тему “Влияние вариаций потоков космических лучей на динамические процессы в нижней атмосфере Земли” (СПбГУ, 2015 г.).

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Полный объем диссертации составляет **327** страниц, включая **127** рисунков и **4** таблицы. Список литературы насчитывает **414** наименований.

Краткое содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, изложены основные проблемы физики солнечно-атмосферных связей и дана общая характеристика диссертационной работы. Сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна, степень достоверности и апробация полученных результатов, кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** сформулированы основные проблемы солнечно-атмосферной физики (**раздел 1.1**) и дан обзор возможных физических механизмов влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы (**раздел 1.2**). В **разделе 1.2** перечислены основные физические агенты, которые могут обеспечить связь между активными явлениями на Солнце и процессами в нижней атмосфере. К ним относятся а) вариации интегральной интенсивности солнечного излучения (TSI), б) вариации потока солнечного излучения в ультрафиолетовом диапазоне длин, в) вариации потоков энергичных заряженных частиц в атмосфере Земли (солнечных и галактических космических лучей, авроральных электронов и электронов радиационных поясов). С вариациями потока интегрального и ультрафиолетового солнечного излучения

связаны, соответственно, механизм непосредственного нагрева атмосферы и озонный механизм. Вариации потоков заряженных частиц влияют на скорость ионизации в атмосфере, характеристики глобальной электрической цепи, химический состав и температуру высокоширотной атмосферы, приводя в действие целый ряд механизмов, которые могут действовать одновременно.

В **разделе 1.3** приведены выводы к **главе 1** и обосновывается постановка задач диссертационной работы. Показано, что механизм влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы, погоду и климат достаточно сложен и может быть обусловлен одновременным воздействием ряда солнечно-геофизических факторов. Вариации космических лучей, как солнечных (СКЛ), так и галактических (ГКЛ) играют важную роль в механизме солнечно-атмосферных связей, что связано с их высокой проникающей способностью и значительными вариациями, обусловленными солнечной активностью, на разных временных шкалах. Отмечено, что широтная зависимость ГКЛ и СКЛ приводит к более высокой ионизации в атмосфере внетропических широт, где вследствие значительных температурных контрастов атмосфера нестабильна и имеет место интенсивная циклоническая деятельность. При этом отклик динамических процессов в нижней атмосфере на вариации космических лучей остается недостаточно изученным, и, в частности, непонятны причины пространственного распределения вариаций давления, формирующихся в различных точках земного шара в связи с вариациями КЛ на разных временных шкалах. Серьезной проблемой остается временная неустойчивость корреляционных связей между явлениями солнечной активности/вариациями КЛ и различными атмосферными характеристиками.

Во **второй главе** проведено исследование эффектов солнечных протонных событий (СПС) с энергиями частиц $E > 90$ МэВ в вариациях давления атмосферы и дана интерпретация наблюдаемых эффектов с точки зрения эволюции внетропических барических систем.

В **разделе 2.1** рассмотрены характеристики солнечных протонных событий и их геофизические эффекты в атмосфере Земли (изменения химического состава атмосферы, содержания аэрозоля и прозрачности атмосферы, электрических характеристик атмосферы, поглощение радиоволн в полярных шапках), а также результаты предыдущих исследований эффектов СПС в вариациях метеорологических характеристик во внетропических широтах.

В **разделе 2.2** приводится исследование эффектов СПС в североатлантическом регионе по данным аэрологических зондирований на ряде станций в Северной Атлантике и данным архива реанализа NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996]. Показано, что в связи с исследуемыми событиями происходит статистически значимое резкое понижение давления на всех уровнях тропосферы в области широт 50-60° Северной Атлантики. Эффект наиболее четко выражен у юго-восточного побережья Гренландии (области формирования арктических фронтов) на следующий день после начала события и сопровождается усилением циклонической завихренности. Согласно результатам синоптического анализа, наблюдаемые изменения атмосферных характеристик обусловлены интенсификацией вторичного углубления (регенерации) циклонов в связи с исследуемыми СПС (**рис.1**). Показано, что причиной более интенсивной регенерации циклонов является усиление адвекции холода, наблюдаемое в районе юго-восточного побережья Гренландии в день начала СПС.

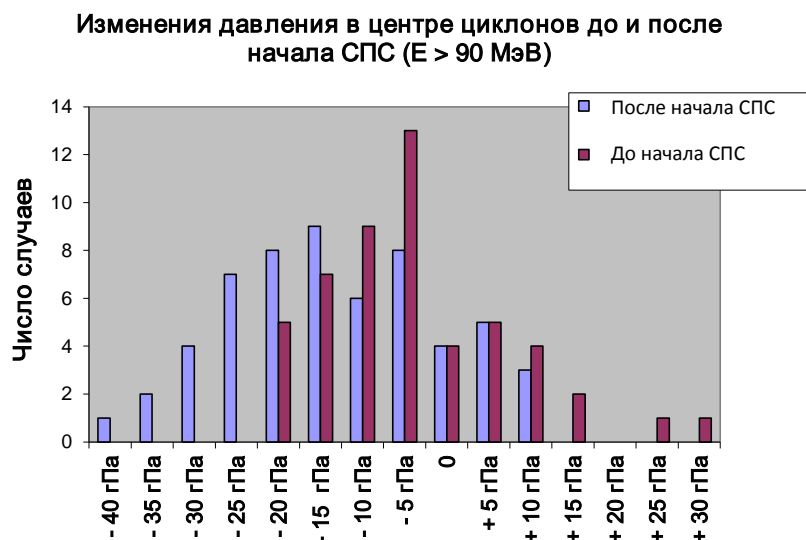


Рис.1. Распределение изменений давления в центре циклонов в умеренных широтах Северной Атлантики ($45\text{--}65^\circ\text{N}$, $0\text{--}60^\circ\text{W}$) за 2 суток до начала СПС и в последующие сутки после начала СПС.

Вариации атмосферного давления в связи с СПС сопоставлены с распределением вертикальной жесткости геомагнитного обрезания. Показано, что в области Северной Атлантики у побережья Гренландии складываются наиболее благоприятные условия для эффектов космических лучей. Данная область характеризуется структурой термобарического поля, способствующей углублению циклонов (высокие контрасты температуры у берегов Гренландии, создающие условия для адвекции холода, расходимость изогипс в средней тропосфере), и при этом – низкими порогами геомагнитного обрезания R_c (< 0.5 ГВ), что позволяет высыпаться заряженным частицам с минимальными энергиями ~ 90 МэВ (**Рис.2**).

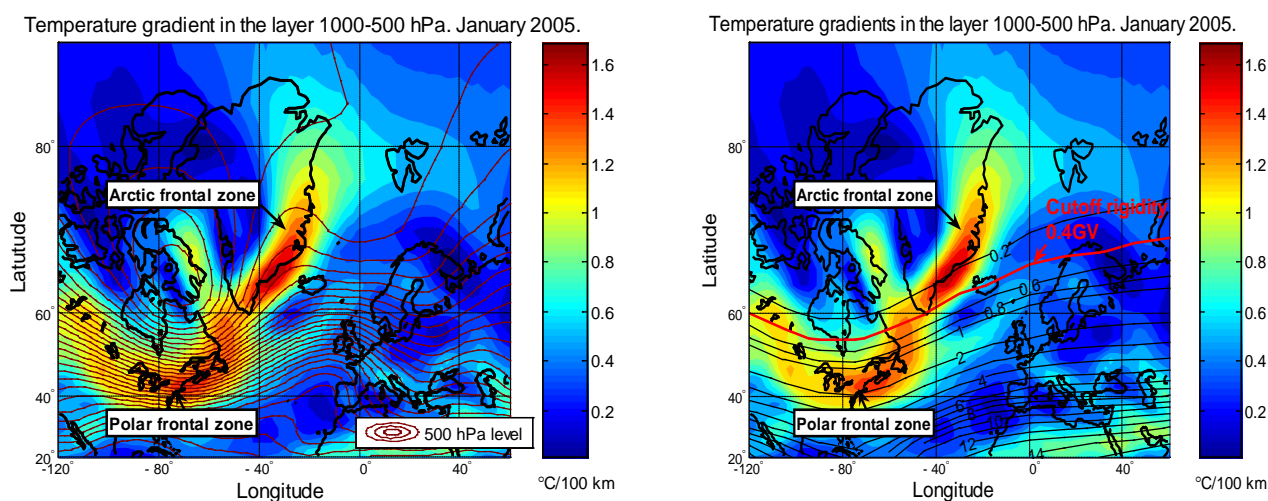


Рис.2. Слева: Распределение модуля горизонтального градиента средней температуры слоя 1000-500 гПа и изогипсы изобарического уровня 500 гПа (январь 2005 г., среднемесячные значения). **Справа:** то же и изолинии вертикальной жесткости геомагнитного обрезания (в ГВ) согласно [Shea and Smart, 1983]. Красной линией показана изолиния жесткости $R_c = 0.4$ ГВ, соответствующая энергии протона ~ 90 МэВ.

В разделе 2.3 рассматриваются эффекты СПС с энергиями > 90 МэВ в вариациях атмосферного давления в масштабах северного и южного полушарий. Показано, что эффекты

СПС отсутствуют на низких широтах. В умеренных и высоких широтах северного полушария наиболее статистически значимые вариации давления локализованы в североатлантическом регионе, где имеют место низкие пороги геомагнитного обрезания ($R_c < 0.5-2$ ГВ). В умеренных широтах тихоокеанского региона, где жесткость геомагнитного обрезания превышает 3–7 ГВ, что соответствует минимальным энергиям частиц, высыпающих в данном регионе, $E_{min} \sim 2-6$ ГэВ, значимых эффектов СПС не обнаружено (рис.3). В южном полушарии обнаружено статистически значимое понижение давления у берегов Земли Королевы Мод в области формирования антарктических фронтов, где, как и у побережья Гренландии, имеет место регенерация циклонов. Данная область также характеризуется низкими порогами геомагнитного обрезания $R_c \leq 0.5-2$ ГВ. Таким образом, эффект энергичных СПС, наблюдаемый в первые 1-2 суток после начала события, обусловлен интенсификацией регенерации циклонов на арктических и антарктических фронтах, попадающих в область высыпания частиц с энергиями ~ 100 МэВ, т.е. энергиями, достаточными для проникновения в стратосферу.

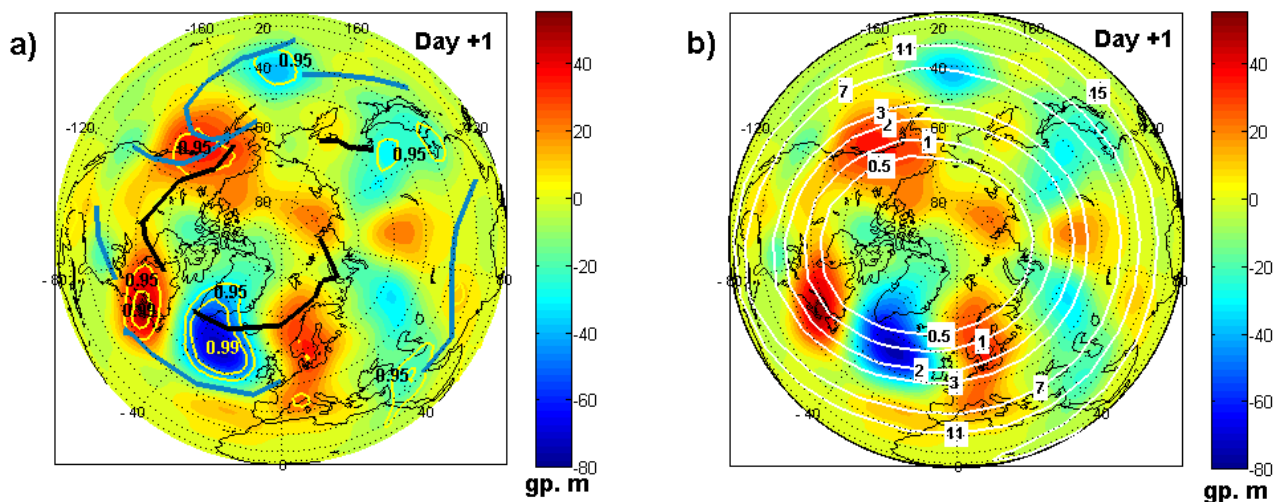


Рис.3. Средние изменения геопотенциальной высоты изобарического уровня 500 гПа (GPH500) в северном полушарии на следующий день после начала СПС с энергиями частиц > 90 МэВ (число событий $N=48$, октябрь-март 1980-1996 гг.). а) Области статистической значимости эффектов согласно оценкам по методу Монте-Карло (желтые линии) и климатическое положение фронтов в январе согласно [Хромов и Петросянец, 1994]: полярные фронты – синие линии, арктические фронты – красные линии. б) Изолинии вертикальной жесткости геомагнитного обрезания R_c (в ГВ) согласно [Shea and Smart, 1983].

В разделе 2.4 обсуждаются основные проблемы физического механизма эффектов СПС в интенсивности внетропического циклогенеза. Приведены изменения скорости ионизации в ходе исследуемых событий и оценки энергии, которая могла быть внесена в стратосферу космическими частицами, а также кинетической энергии циклона. Показано, что скорость преобразования доступной потенциальной энергии в кинетическую энергию циклона составляет $\sim 10^{25}$ эрг/сут, что на несколько порядков превышает скорость поступления энергии в стратосферу за счет солнечных протонов. Предположено, что высыпания энергичных частиц приводят к изменениям структуры термобарического поля в высоких широтах (области формирования арктических и антарктических фронтов), которые способствуют более интенсивному углублению циклонов.

В разделе 2.5 приведены выводы к главе 2. Отмечено, что СПС с энергиями частиц, достаточными для прохождения в верхнюю стратосферу, способствуют более интенсивной регенерации циклонов на арктических и антарктических фронтах высоких широт. Область Северной Атлантики у побережья Гренландии является особым регионом, где складываются наиболее благоприятные условия, как геофизические, так и атмосферные, для формирования эффектов энергичных СПС в эволюции внетропических циклонов.

В третьей главе исследуются эффекты Форбуш-понижений галактических космических лучей в вариациях давления атмосферы и изменения в эволюции барических систем, вызывающих эти вариации, а также проводится сравнительный анализ эффектов СПС и Форбуш-понижений ГКЛ в циркуляции нижней атмосферы северного полушария.

В разделе 3.1 приводятся определение Форбуш-понижений в интенсивности потока ГКЛ, механизм их формирования, типы высокоскоростных потоков солнечного ветра, которыми обусловлены Форбуш-понижения, характеристики Форбуш-понижений и их распределение в цикле солнечной активности.

В разделе 3.2 рассматривается пространственное распределение вариаций давления в северном и южном полушариях в ходе Форбуш-понижений ГКЛ с амплитудой $\geq 2\%$ по данным нейтронного монитора ст. Апатиты ($R_c = 0.65$ ГВ) для холодных месяцев (октябрь-март). Показано, что в связи с исследуемыми событиями имеет место постепенный рост давления с максимумом на +3/+4-й дни в умеренных широтах в области климатического положения полярных фронтов. Наиболее статистически значимые эффекты Форбуш-понижений наблюдаются в северном полушарии над восточной частью Северной Атлантики, Северной Европой и Европейской территорией России (рис.4).

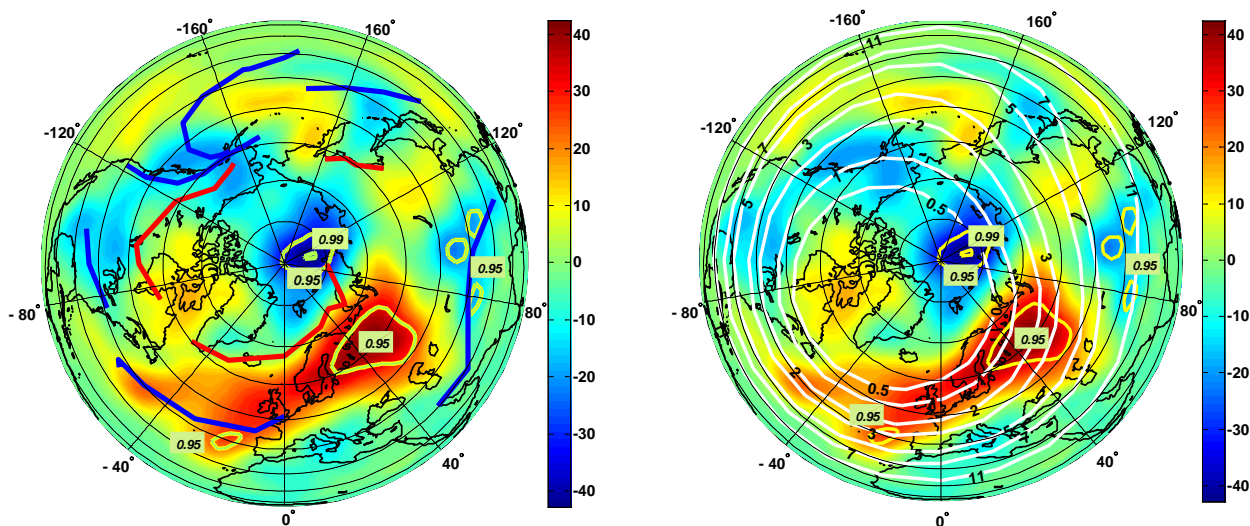


Рис.4. Средние изменения геопотенциальной высоты (в гп. м) изобарического уровня 1000 гПа (GRH1000) в северном полушарии на +4-й день после начала Форбуш-понижений ГКЛ (число событий $N=48$, октябрь-март 1980-2006 гг.). Желтыми линиями показаны области статистической значимости эффектов согласно оценкам по методу Монте-Карло.

Слева: климатическое положение фронтов в январе [Хромов и Петросянец, 1994]: полярные фронты – синие линии, арктические фронты – красные линии. **Справа:** изолинии вертикальной жесткости геомагнитного обреза R_c (в ГВ) согласно [Shea and Smart, 1983].

Согласно данным синоптического анализа, повышение давления в указанном регионе обусловлено интенсификацией формирования блокирующих антициклонов в ходе исследуемых событий. Показано, что, как и в случае СПС, статистически значимые эффекты Форбуш-понижений ГКЛ локализованы в североатлантическом регионе, где пороги геомагнитного обрезания составляют $R_c \sim 0.5\text{--}3$ ГВ (минимальные энергии выпадающих частиц $E_{min} \sim 120$ МэВ–2 ГэВ). В тихоокеанском регионе, где пороги геомагнитного обрезания существенно выше, значимых вариаций давления не обнаружено. В южном полушарии области статистически значимого повышения давления в ходе Форбуш-понижений обнаружены в области климатической депрессии у берегов Земли Королевы Мод и над морем Дюрвиля, где также имеют место низкие пороги геомагнитного обрезания. По данным синоптического анализа, рост давления в указанных областях обусловлен ослаблением циклонов и смещением в высокие широты гребней субтропических антициклонов.

В **разделе 3.3** проводится сравнительный анализ эффектов СПС с энергиями > 90 МэВ и Форбуш-понижений ГКЛ в эволюции внетропических барических систем и вариациях давления нижней атмосферы северного полушария (см. **Таблицу**). Отмечается, что указанные события, вызывающие противоположные эффекты в атмосферной ионизации, способствуют развитию внетропических барических систем противоположного типа, несмотря на различия в амплитуде вариаций и области высот, достигаемых частицами СКЛ и ГКЛ. Высыпания солнечных протонов с энергиями ~ 100 МэВ сопровождаются активизацией динамических процессов (углублению циклонов) на высокоширотных арктических фронтах, что приводит к понижению давления над Северной Атлантикой. Вариации галактических космических лучей с энергиями от 200 МэВ до 3–4 ГэВ сопровождаются интенсификацией антициклонов на полярных фронтах умеренных широт и, соответственно, повышением давления над восточной частью Северной Атлантики, Северной Европой и Европейской территорией России. Наиболее статистически значимые эффекты вариаций как солнечных, так и галактических космических лучей наблюдаются в североатлантическом регионе.

В **разделе 3.4** приведены выводы к главе 3. Форбуш-понижения ГКЛ способствуют более интенсивному формированию блокирующих антициклонов на полярных фронтах умеренных широт северного полушария. Подтверждены выводы, сделанные в главе 2, что область Северной Атлантики является особым регионом, где складываются наиболее благоприятные условия для формирования эффектов вариаций солнечных и галактических космических лучей.

В **четвертой главе** исследуются особенности пространственно-временной структуры долговременных эффекты солнечной активности и галактических космических лучей в вариациях давления тропосферы, а также возможные причины временной изменчивости солнечно-атмосферных связей.

В **разделе 4.1** показано, что временная неустойчивость корреляционных связей, наблюдаемых между атмосферными характеристиками и явлениями солнечной активности, является одной из наиболее серьезных проблем солнечно-атмосферной физики. Приводится обзор изменений характера корреляционных связей между различными атмосферными характеристиками и солнечно-геофизическими факторами.

Таблица. Эффекты вариаций КЛ в циркуляции нижней атмосферы (северное полушарие).

	Солнечные протонные события	Форбуш-понижения ГКЛ
Энергия частиц КЛ	>90 МэВ	>200 МэВ
Диапазон высот, достигаемых частицами КЛ	~35–40 км	~10–15 км
Изменения скорости ионизации на высотах, достигаемых частицами КЛ	Увеличение скорости ионизации от ~10 до нескольких сотен $\text{см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$	Уменьшение скорости ионизации на ~1-3 $\text{см}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$
Наиболее статистически значимые эффекты в вариациях давления	Понижение давления	Повышение давления
Локализация области наиболее статистически значимых изменений давления	Северная Атлантика, юго-восточное побережье Гренландии	Восточная часть Северной Атлантики, Северная Европа, северная часть Европейской территории России
Максимальные изменения давления (ΔGPH) и их высотный диапазон	-80...-100 гп м 300–500 гПа	+50 гп м 1000 гПа (уровень моря)
Характерное время отклика атмосферы	$\leq 1-2$ сут	~3–4 сут
Характерные динамические процессы	Регенерация циклонов на арктических фронтах	Формирование блокирующих антициклонов на полярных фронтах
Атмосферные условия в области максимальных эффектов КЛ	Высокие контрасты температуры между ледниковой поверхностью Гренландии и более теплым океаном; расходимость изогипс над океаном	Прогретость атмосферы над теплым Северо-Атлантическим течением, сходимость изогипс над Евразийским континентом
Вертикальная жесткость геомагнитного обрезания в области максимальных эффектов КЛ	~0.4–1 ГВ	~1–3 ГВ

В разделе 4.2 (подразделы 4.2.1 и 4.2.2) исследуется пространственное распределение эффектов ГКЛ в вариациях давления тропосферы (геопотенциальной высоты уровня 700 гПа GPH700) северного и южного полушарий по данным реанализа NCEP/NCAR и скорости счета NM нейтронного монитора в Клаймаксе ($R_c = 2.99$ ГВ), характеризующей интенсивность ГКЛ (данные с 1953 г.). Выявлена региональная зависимость эффектов ГКЛ. Показано, что пространственная структура вариаций давления, коррелирующих с изменениями потока ГКЛ в

11-летнем солнечном цикле, определяется климатическим положением главных атмосферных фронтов независимо от временного периода. При этом имеет место временная изменчивость эффектов ГКЛ: знаки коэффициентов корреляции $R(GPH700, NM)$ в выделенных регионах меняются на противоположные в зависимости от рассматриваемого периода времени. Изменение знака корреляции по всем регионам земного шара обнаружено в начале 1980-х гг.

В период с начала 1980-х гг. по 2000 г. наблюдаются наиболее статистически значимые коэффициенты корреляции между давлением и потоками ГКЛ на полярных фронтах умеренных широт, что свидетельствует о влиянии вариаций ГКЛ на развитие внетропического циклогенеза (рис.5а,в). Увеличение потока ГКЛ в минимумах 11-летних циклов солнечной активности сопровождается понижением давления на полярных фронтах (усилением циклонических процессов). В высокоширотной области северного полушария, ограниченной арктическими

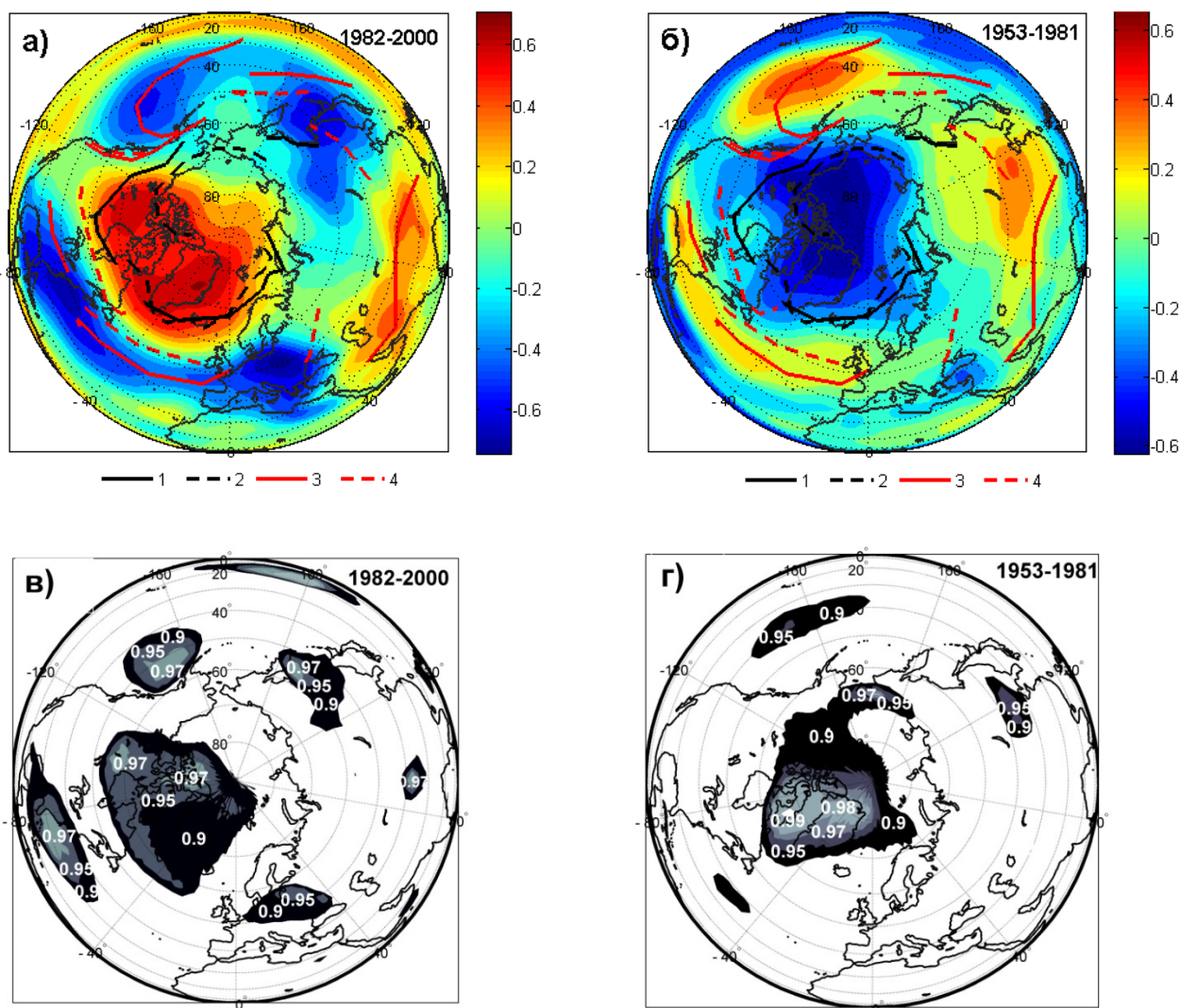


Рис.5. Вверху: Распределение коэффициентов корреляции между среднегодовыми значениями GPH700 и интенсивности ГКЛ $R(GPH700, NM)$ в северном полушарии для временных периодов 1982-2000 гг. (а) и 1953-1981 гг. (б). Климатическое положение фронтов: 1 – арктический фронт, январь; 2 – арктический фронт, июль; 3 – полярный фронт, январь; 4 – полярный фронт, июль [Хромов и Петросянц, 1994]. **Внизу:** Уровни статистической значимости коэффициентов корреляции $R(GPH700, NM)$ 0.9, 0.95, 0.97 и 0.99 (в градациях серого цвета) согласно оценкам по методу рандомизации фаз [Ebisuzaki, 1997].

фронтами, коэффициенты корреляции между давлением и интенсивностью ГКЛ противоположны по знаку коэффициентам корреляции в умеренных широтах.

В предыдущий период 1953-1981 гг. эффекты ГКЛ в высоких и умеренных широтах имели противоположный знак (**рис.56**). Аналогичная картина (изменение в начале 1980-х гг. знака корреляции между давлением на полярных фронтах и интенсивностью ГКЛ) наблюдалось также для южного полушария. Показано, что эффекты ГКЛ в вариациях внетропического циклогенеза наиболее выражены в холодное время года независимо от временного периода. В летние месяцы коэффициенты корреляции $R(GPH700, NM)$ на полярных фронтах умеренных широт сохраняются, но выражены слабее. Согласно данным **подраздела 4.2.2.**, временной ход коэффициентов корреляции между давлением в различных широтных поясах и интенсивностью предполагает наличие долговременных вариаций амплитуды и знака эффектов ГКЛ в атмосферной циркуляции с предположительным периодом ~50–60 лет.

В **подразделе 4.2.3** исследована временная изменчивость эффектов ГКЛ в вариациях давления атмосферы на более длительном интервале времени. Для этого использовались данные архива приземного давления MSLP (Climatic Research Unit, East England University) за период 1873-2000 гг. и числа Вольфа R_z , характеризующие уровень солнечной активности. Интенсивность ГКЛ обнаруживает достаточно высокую отрицательную корреляцию с числами Вольфа ($R \sim -0.8$). Тем не менее, поскольку в корреляции атмосферных характеристик с числами Вольфа могут, помимо ГКЛ, давать вклад и другие агенты солнечной активности, будем называть эти корреляции эффектами СА/ГКЛ. Обнаружено, что временная структура эффектов СА/ГКЛ в вариациях давления тропосферы в высоких и умеренных широтах характеризуется четко выраженной ~60-летней периодичностью. Выявлены изменения знака корреляции между приземным давлением (SLP) в высоких широтах и числами Вольфа в конце XIX века, начале 1920-х, 1950-х и начале 1980-х гг. Наличие ~60-летней периодичности в коэффициентах корреляции между приземным давлением и числами Вольфа $R(SLP, R_z)$ в умеренных широтах подтверждена результатами Фурье- и вейвлет-анализа.

В **разделе 4.3** рассматривается связь долговременных эффектов СА/ГКЛ в вариациях давления нижней атмосферы с эволюцией крупномасштабной атмосферной циркуляции. Обнаружено, что обращения знака корреляции $R(SLP, R_z)$ имели место при переходах между холодными и теплыми эпохами в Арктике, связанных с изменениями состояния циркумполярного вихря [Гудкович и др., 2009]. Периоды изменения знака корреляции $R(SLP, R_z)$ совпадают также с переломными точками в эволюции крупномасштабной циркуляции меридионального (С) типа по классификации Вангенгейма-Гирса (т.е. переходами от увеличения к уменьшению повторяемости данной формы и наоборот). Повторяемость данной формы циркуляции также характеризуется ~60-летней периодичностью.

В **разделе 4.4.** рассмотрена эволюция стратосферного циркумполярного вихря как возможной причины временной изменчивости эффектов СА/ГКЛ в тропосферной циркуляции. Изменения состояния циркумполярного вихря оценивались на основе данных реанализа NCEP/NCAR в средней тропосфере и стратосфере (с 1948 г.). Временной ход коэффициентов корреляции $R(SLP, R_z)$ и $R(GPH700, NM)$ для высокоширотной области 60-85°N сопоставлен с

характеристиками вихря и эволюцией основных форм крупномасштабной циркуляции (W, C, E) по классификации Вангенгейма-Гирса на **рис.6**.

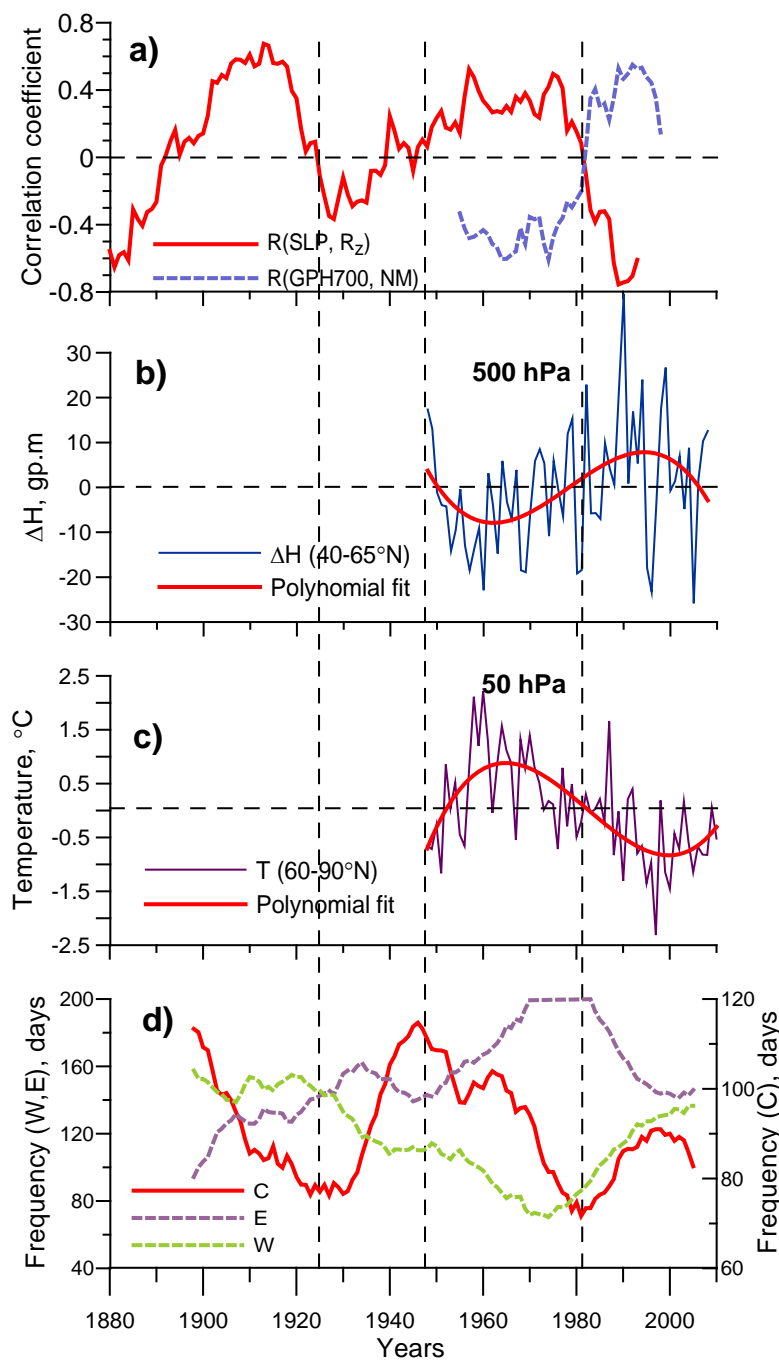


Рис.6. а) Временной ход коэффициентов корреляции по скользящим 15-летним интервалам между среднегодовыми значениями давления атмосферы в области 60-85°N и солнечно-геофизическими индексами: $R(SLP, R_z)$ – сплошная красная линия, $R(GPH700, NM)$ – штриховая синяя линия; б) аномалии (отклонения от климатического среднего) разности геопотенциальных высот ΔH уровня 500 гПа между широтами 40-65°N (среднегодовые значения); с) аномалии (отклонения от климатического среднего) среднегодовой температуры на уровне 50 гПа в области 60-90°N; д) частоты повторяемости (число дней в году) основных форм циркуляции по Вангенгейму-Гирсу (15-летние скользящие средние). Вертикальные штриховые линии показывают годы обращения знака коэффициентов корреляции.

Данные на **рис.6** показывают, что в период 1950-1980 гг. циркумполярный вихрь был ослаблен. Это выразилось в уменьшении градиентов давления между умеренными и высокими

широтами в средней тропосфере и повышением температуры в стратосфере в области формирования вихря. Данный период характеризовался также уменьшением частоты повторяемости меридиональной циркуляции (формы С) и похолоданием в Арктике. С начала 1980-х по начало 2000-х гг. вихрь был значительно сильнее, о чем свидетельствует увеличение градиентов давления между умеренными и высокими широтами и понижение стратосферной температуры. В данный период частота повторяемости меридиональной (С) циркуляции уменьшалась, в Арктике наблюдалось потепление. Таким образом, изменение знака эффектов СА/ГКЛ в начале 1980-х гг. произошло при переходе от слабого к сильному вихрю. Изменение состояния вихря в 1980-х гг. подтверждены исследованием аномалий скорости зонального западного ветра в стратосфере высоких широт (60-80 °N) по данным реанализа NCEP/NCAR.

В период с конца XIX века до 1948 г. интенсивность вихря оценивалась по колебаниям приземных температур и давления в полярной области (фазам Арктической Осцилляции). Временной ход аномалий указанных характеристик приведен на **рис.7а**. Видно, что колебания температуры и давления в Арктике изменяются в противофазе и обнаруживают отчетливую ~60-летнюю периодичность. Слабый вихрь (положительная аномалия SLP и холодная эпоха в Арктике) имел место в ~1900-1920 гг. и ~1950-1980 гг. Сильный вихрь (отрицательная аномалия SLP и теплая эпоха в Арктике) наблюдался в периоды ~1880-1900 гг., ~1920-1950 гг. и с начала 1980-х гг. Обращения знака коэффициентов корреляции $R(SLP, R_z)$ совпадают с

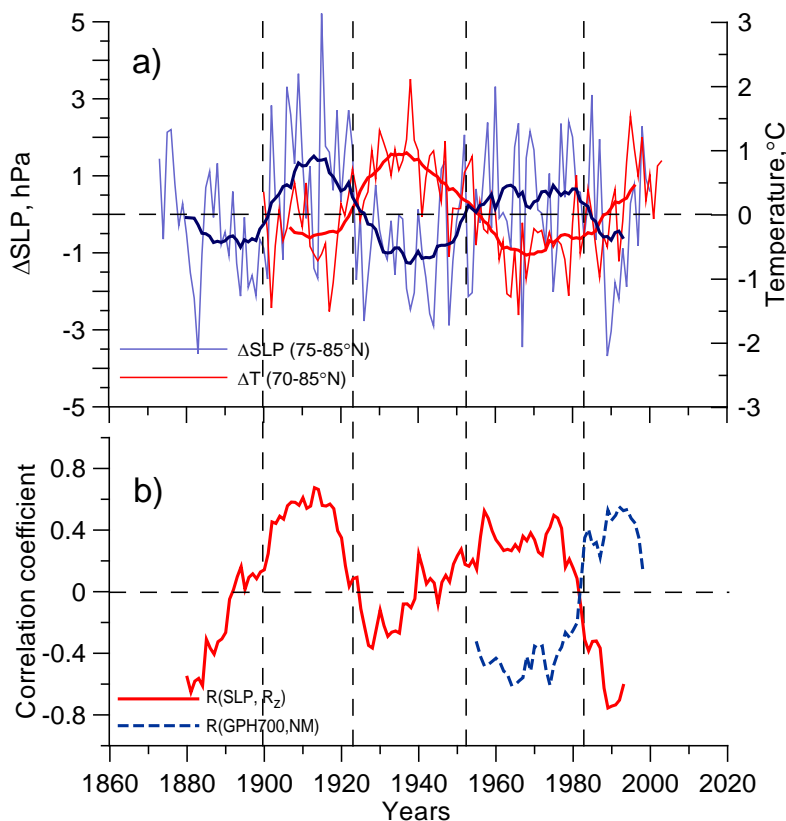


Рис.7. а) Аномалии приземного давления ΔSLP (тонкая синяя линия) и приземной температуры ΔT (тонкая красная линия) в Арктическом регионе. Толстыми линиями показаны 15-летние скользящие средние; б) временной ход коэффициентов корреляции по скользящим 15-летним интервалам между среднегодовыми значениями давления в области 60-85°N и характеристиками СА/ГКЛ: $R(SLP, R_z)$ – сплошная красная линия, $R(GPH700, NM)$ – штриховая синяя линия. Вертикальные штриховые линии показывают переходы между фазами Арктической Осцилляции.

переходами между различными фазами Арктической Осцилляции, соответствующими различным состояниям циркумполярного вихря (рис.7б).

В разделе 4.5 приведены выводы к главе 4. Пространственная структура эффектов ГКЛ в циркуляции нижней атмосферы внетропических широт определяется климатическим положением главных атмосферных фронтов (полярных и арктических/антарктических). Временная структура эффектов СА/ГКЛ характеризуется ~60-летней периодичностью, обусловленной эволюцией крупномасштабной циркуляции атмосферы и состоянием циркумполярного вихря. Усиление циклогенеза на полярных фронтах при увеличении потока ГКЛ в минимумах 11-летнего солнечного цикла наблюдается только в эпохи сильного вихря.

В пятой главе исследуется временная изменчивость корреляционной связи между облачностью в умеренных широтах и потоками ГКЛ на десятилетней временной шкале, а также рассматриваются возможные причины нарушения корреляции в начале 2000-х гг.

В разделе 5.1 приведен обзор исследований корреляционных связей между состоянием облачности и солнечно-геофизическими характеристиками, отмечены проблемы, связанные с нарушением корреляции между нижней облачностью и потоками ГКЛ на десятилетней временной шкале, произошедшим в начале 2000-х гг.

В разделе 5.2 показана связь облачности во внетропических широтах с развитием циклонической деятельности.

В разделе 5.3 исследуются аномалии нижней облачности (LCA) в умеренных широтах северного и южного полушарий по данным Международного спутникового проекта по климатологии облачности (ISCCP-D2, 1983-2009 гг.), а также временные вариации корреляционных связей указанных аномалий с потоками заряженных космических частиц F_{CR} в стратосфере по данным аэростатных измерений ФИАН в умеренных широтах [Stozhkov et al., 2009].

Обнаружено (подраздел 5.3.1), что временные вариации LCA в умеренных широтах северного и южного полушарий в значительной степени подобны. Сезонные вариации LCA ярко выражены в северном полушарии, где циклонические процессы усиливаются в холодные месяцы, и отсутствуют в южном полушарии, где циклоническая активность остается высокой в течение всего года. Характер сезонных вариаций LCA подтверждает их динамическую природу.

В подразделе 5.3.2 показано, что эффекты ГКЛ в вариациях состояния облачности (прихода солнечной радиации) на десятилетней временной шкале могут частично компенсироваться эффектами других солнечно-геофизических явлений (в частности, вспышечной и авроральной активности). Тем не менее, вариации ГКЛ продолжают оставаться одним из наиболее важных факторов, влияющих на процессы в нижней атмосфере. Исследование показало, что временной ход коэффициентов корреляции между аномалиями нижней облачности по данным IPCC-D2 и интенсивностью ГКЛ обнаруживает сходный характер для умеренных широт обоих полушарий. Наиболее высокая положительная корреляция LCA-ГКЛ наблюдалась с середины 1980-х по конец 1990-х гг. Резкое изменение характера корреляции произошло в начале 2000-х гг. практически одновременно в обоих полушариях.

В разделе 5.4 исследуются изменения циклонической активности в умеренных широтах в связи с вариациями ГКЛ, а также роль этих изменений в формировании эффектов ГКЛ в вариациях состояния облачности. Обнаружено, что с середины 1980-х до середины 1990-х гг. имела место высокая отрицательная корреляция ($R(GPH700, F_{CR}) \sim -0.8$) между давлением (геопотенциальными высотами изобарического уровня 700 гПа GPH700) в умеренных широтах северного и южного полушарий и потоками ГКЛ, что указывает на усиление циклонических процессов при увеличении потоков ГКЛ в данный период. При этом между аномалиями нижней облачности и потоками ГКЛ наблюдалась положительная корреляция $R(LCA, F_{CR}) \sim 0.6-0.8$, что согласуется с характером изменений циклонической деятельности. В начале 2000-х гг. произошло резкое изменение характера корреляционных связей между интенсивностью циклонических процессов и потоками ГКЛ. Одновременно с изменением знака коэффициентов корреляции $R(GPH700, F_{CR})$ произошло изменение знака коэффициентов корреляции между аномалиями нижней облачности и потоками ГКЛ. Таким образом, корреляционные связи между облачностью и потоками ГКЛ, наблюдаемые в масштабе 11-летнего цикла, обусловлены влиянием ГКЛ на развитие циклонической деятельности.

В разделе 5.5 временные вариации корреляционных связей между давлением/нижней облачностью в умеренных широтах и потоками ГКЛ сопоставлены с вариациями интенсивности стратосферных циркумполярных вихрей северного и южного полушарий. Показано, что возможной причиной нарушения корреляционных связей LCA-ГКЛ является резкое ослабление циркумполярных вихрей в начале 2000-х гг., которое привело к изменению связи между циклоническими процессами в умеренных широтах и интенсивностью ГКЛ. Сопоставление временного хода коэффициентов корреляции $R(GPH700, F_{CR})$ и $R(LCA, F_{CR})$ с вариациями интенсивности вихрей приведено на рис.8. Согласно данным на рис.8, в период с начала 1980-х по конец 1990-х гг. наблюдалась положительная аномалия скорости зонального ветра (U-компоненты) на уровне стратосферы 50 гПа в области широт 60-80° обоих полушарий в холодное (для данного полушария) полугодие. Наибольшее увеличение скорости ветра (+4–6 м·с⁻¹) в данный период отмечается в северном полушарии. Видно, что отрицательная корреляция между давлением в умеренных широтах и потоками ГКЛ и, соответственно, положительная корреляция аномалий нижней облачности с потоками ГКЛ в ~1983-2000 гг. имела место при усилении вихрей в обоих полушариях. Резкое ослабление вихрей в начале 2000-х гг. сопровождалось изменением характера корреляционных связей между интенсивностью циклонических процессов в умеренных широтах и потоками ГКЛ и, соответственно, изменением знака корреляции между облачностью и потоками ГКЛ.

В разделе 5.6 приведены выводы к главе 5. Связи, наблюдаемые между облачностью в умеренных широтах и потоками ГКЛ в масштабе 11-летнего солнечного цикла, обусловлены влиянием ГКЛ на интенсивность циклонической деятельности, которое зависит от состояния циркумполярного вихря. Возможной причиной нарушения корреляции между облачностью и потоками ГКЛ в начале 2000-х гг. является резкое ослабление циркумполярных вихрей северного и южного полушарий, что привело к изменению роли вариаций ГКЛ в развитии внетропического циклогенеза. Нарушение корреляции LCA-ГКЛ не свидетельствует об отсутствии влияния ГКЛ на формирование облачности, но показывает, что эффекты,

наблюдаемые на коротких временных интервалах и в масштабе 11-летнего цикла, имеют разную природу.

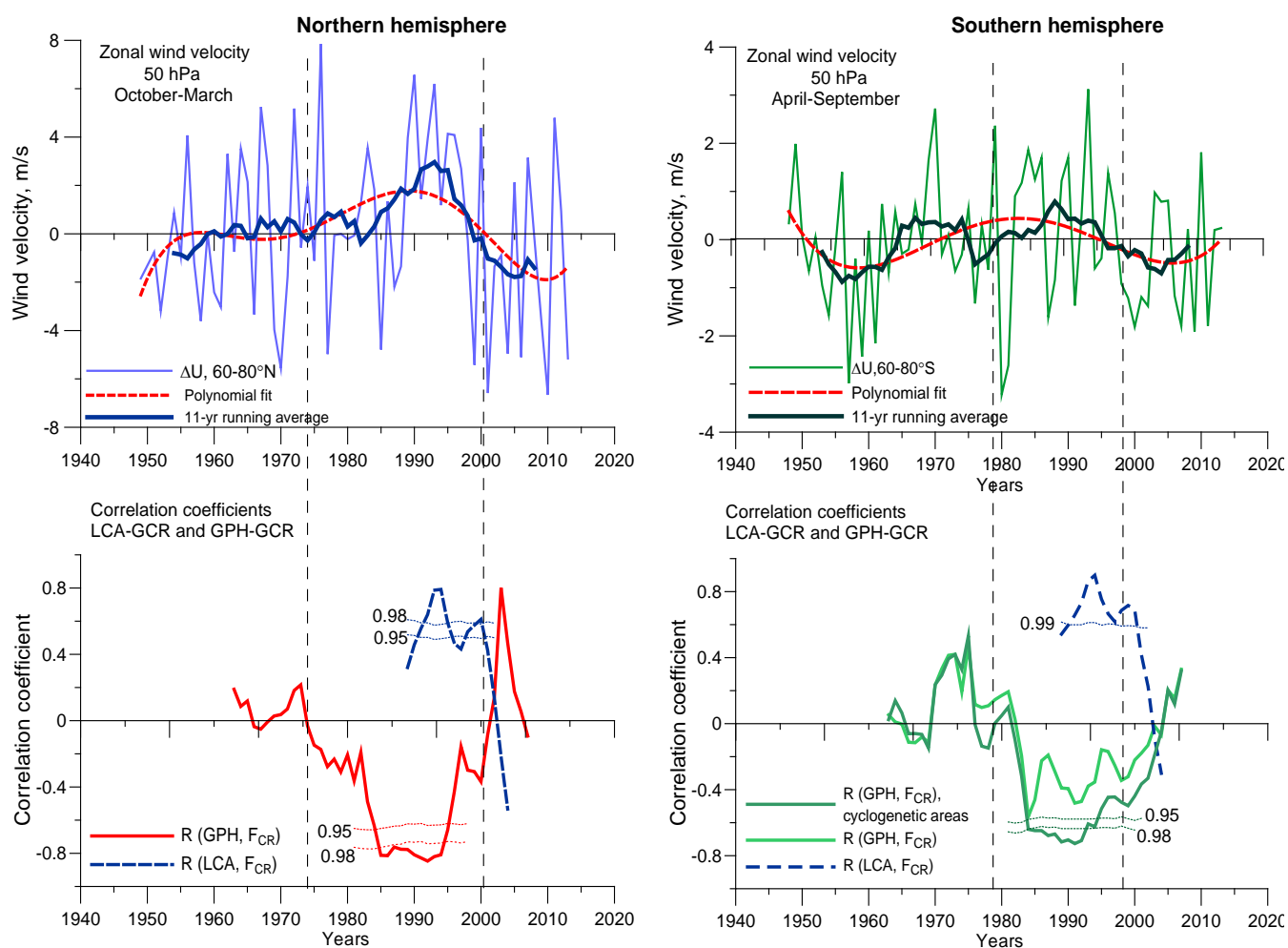


Рис.8. Вверху: Вариации средней скорости зонального ветра (U -компоненты) на уровне 50 гПа в стратосфере высоких широт $60-80^\circ$ в холодное полугодие.

Внизу: коэффициенты корреляции по скользящим 11-летним интервалам между аномалиями облачности/давления в умеренных широтах $30-60^\circ$ северного и южного полушарий и потоками ГКЛ: *синяя штриховая линия* – между аномалиями нижней облачности в умеренных широтах $30-60^\circ N(S)$ и потоками ГКЛ $R(LCA, F_{CR})$; *красная (светло-зеленая) линия* – между аномалиями давления и потоками ГКЛ $R(GPH700, F_{CR})$ для всего широтного пояса $30-60^\circ N(S)$; *темно-зеленая линия* – между аномалиями давления в областях циклогенеза южного полушария и потоками ГКЛ. Точечными линиями показаны уровни значимости коэффициентов корреляции согласно оценкам по методу Монте-Карло. Вертикальные штриховые линии показывают переходы между различными состояниями вихря.

В главе 6 рассмотрены возможные механизмы влияния вариаций космических лучей на циркуляцию нижней атмосферы на разных временных шкалах. В разделе 6.1 отмечено, что интенсификация циклонов (антициклонов) в связи с кратковременными вариациями КЛ, свидетельствует о формировании более благоприятных условий для их эволюции в ходе исследуемых событий. Возможной причиной более интенсивного развития барических систем является, по-видимому, изменение структуры термобарического поля в связи с изменениями радиационно-теплового баланса в атмосфере, которые могут быть обусловлены вариациями

состояния облачности. Показано, что энергетическим источником кратковременных эффектов КЛ могут быть вариации уходящего теплового излучения, возникающие за счет изменения облачности. Усиление облачности в связи с СПС в зимнее время способствует повышению температуры в циклоне, что приводит к сохранению адвекции холода в течение более длительного времени и углублению циклона. Ослабление облачности в ходе Форбуш-понижений ГКЛ может привести к более интенсивному радиационному выхолаживанию в антициклоне, что будет создавать более благоприятные условия его преобразования в блокирующий антициклон, поддерживая разность температуры между антициклоном и теплым воздухом над Северо-Атлантическим течением и способствуя адвекции тепла. Таким образом, механизм кратковременных эффектов КЛ не требует поступления дополнительной энергии извне (напр., солнечной коротковолновой радиации, энергии ГКЛ и СКЛ) для энергетического обеспечения наблюдаемых изменений в эволюции барических систем. Роль космических частиц сводится к перераспределению потоков энергии, накопленной в самой атмосфере.

В разделе 6.2 предположено, что физический механизм формирования эффектов ГКЛ в интенсивности циклонической деятельности на длительных временных шкалах отличается от механизма кратковременных эффектов. Об этом свидетельствует временная изменчивость корреляционных связей, наблюдаемых между атмосферными и солнечно-геофизическими характеристиками. Выявленная ~60-летняя периодичность эффектов СА/ГКЛ в вариациях атмосферных характеристик указывает на возможную модуляцию влияния солнечной активности некоторым атмосферным фактором, имеющим аналогичную периодичность. Результаты данного исследования позволяют предположить, что таким фактором может быть эволюция стратосферного циркумполярного вихря. Состояние вихря оказывает влияние на взаимодействие тропосферы и стратосферы и, по-видимому, играет важную роль при передаче возмущения, создаваемого явлениями солнечной активности, из верхней атмосферы в нижнюю. Расположение циркумполярного вихря создает благоприятные условия для работы ряда механизмов, связанных с различными гелиогеофизическими факторами (вариациями солнечных и галактических космических лучей, высыпаниями авроральных электронов и т.д.), что позволяет рассматривать вихрь как важное связующее звено между явлениями солнечной активности и циркуляцией нижней атмосферы.

В разделе 6.3. приведены выводы к главе 6. На временных шкалах порядка суток изменения в эволюции внетропических барических систем в связи с вариациями КЛ могут быть обусловлены влиянием скорости ионизации на интенсивность облакообразования (механизм ион-индуцированной нуклеации и “электрические” механизмы), так и на химический состав высокоширотной атмосферы. На длительных временных шкалах важную роль в механизме формирования эффектов СА/ГКЛ в интенсивности внетропического циклогенеза играет эволюция стратосферного циркумполярного вихря.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1) Пространственная структура отклика атмосферного давления на кратковременные вариации космических лучей (солнечные протонные события и Форбуш-понижения ГКЛ) обусловлена интенсификацией внетропических барических систем в связи с исследуемыми событиями. Солнечные протонные события (СПС) с энергиями частиц, достаточными для

проникновения в стратосферу ($E > 90$ МэВ), способствуют интенсификации вторичного углубления (регенерации) циклонов в Северной Атлантике в районе юго-восточного побережья Гренландии. Причиной более интенсивной регенерации является усиление адвекции холода в первые 1-2 суток после начала события. Интенсификация углубления циклонов в связи с энергичными СПС приводит к понижению давления над Северной Атлантикой и формированию высотного гребня над Центральной и Северной Европой. Форбуш-понижения ГКЛ способствуют более интенсивному формированию блокирующих антициклонов в североатлантическом регионе, что приводит к росту давления над восточной частью Северной Атлантики, Скандинавией и Европейской территорией России (ЕТР).

2) Северная Атлантика является особым регионом, где складываются наиболее благоприятные условия для формирования эффектов кратковременных вариаций космических лучей в эволюции внетропических барических систем. Данная область характеризуется благоприятной структурой термобарического поля (высокими контрастами температуры в арктической фронтальной зоне у побережья Гренландии, расходимостью изогипс над океаном), что способствует углублению циклонов. Формированию блокирующих антициклонов над восточной частью Северной Атлантики способствует прогретость атмосферы над Северо-Атлантическим течением и сходимостью изогипс над Евразийским континентом. При этом область Северной Атлантики характеризуется низкими порогами геомагнитного обрезания (вертикальные жесткости геомагнитного обрезания R_c варьируют от ≤ 0.5 ГВ в районе арктической фронтальной зоны до ~ 3 ГВ над ЕТР). Это создает условия для высыпания в данном регионе заряженных космических частиц с минимальными энергиями от ~ 100 МэВ до ~ 2 ГэВ, т.е. компоненты космических лучей, наиболее варьированной в связи с солнечной активностью.

3) Изменения скорости ионизации в связи с вариациями космических лучей играют важную роль в механизме солнечно-атмосферных связей. Противоположные по знаку изменения скорости ионизации в атмосфере высоких и умеренных широт, обусловленные СПС и Форбуш-понижениями ГКЛ, способствуют развитию противоположных эффектов в эволюции барических систем в североатлантическом регионе: интенсификации циклонов (падению давления) и антициклонов (росту давления), соответственно. Аналогичные эффекты в связи с СПС и Форбуш-понижениями ГКЛ обнаружены в южном полушарии в области климатической депрессии у берегов Земли Королевы Мод. Эффекты СПС и Форбуш-понижений ГКЛ в эволюции барических систем локализованы в североатлантическом регионе, характеризующемся низкими порогами геомагнитного обрезания. В тихоокеанском регионе, где жесткости геомагнитного обрезания существенно выше, эффектов указанных вариаций КЛ не обнаружено. В зависимости от энергии высыпавшихся космических частиц имеют место изменения циклонической деятельности на арктических фронтах высоких широт или полярных фронтах умеренных широт. Высыпания солнечных протонов с энергиями ~ 100 МэВ в высоких широтах приводит к активизации атмосферных процессов на арктических фронтах, вариации более энергичных галактических космических лучей – на полярных фронтах.

4) Эффекты СА/ГКЛ в вариациях давления тропосферы, наблюдаемые в масштабе 11-летнего солнечного цикла, имеют четко выраженный широтно-региональный характер.

Пространственная структура изменений давления, коррелирующих с вариациями ГКЛ, определяется климатическим положением главных атмосферных фронтов: арктических и антарктических фронтов высоких широт и полярных фронтов умеренных широт.

5) Временная структура эффектов СА/ГКЛ в вариациях давления тропосферы высоких и умеренных широт характеризуется четко выраженной ~60-летней периодичностью. Обнаружено, что изменения знака корреляции между приземным давлением во внетропических широтах и числом солнечных пятен имели место в 1890-х гг., начале 1920-х гг., в 1950-х гг., а также в начале 1980-х и 2000-х гг. Обращения знака корреляций совпадают по времени со сменой эпох крупномасштабной циркуляции атмосферы.

6) Изменение характера корреляционных связей между динамическими процессами в атмосфере и характеристиками СА/ГКЛ тесно связаны с изменениями состояния стратосферного циркумполярного вихря. На основе данных реанализа NCEP/NCAR и колебаний приземных температуры и давления в полярной области (Арктической Осцилляции) выявлена ~60-летняя периодичность в вариациях интенсивности вихря. Показано, что обращения знака коэффициентов корреляции между давлением атмосферы и характеристиками СА/ГКЛ имеют место при переходе циркумполярного вихря из одного состояния в другое.

7) Эффекты ГКЛ в вариациях интенсивности внетропического циклогенеза в масштабах 11-летнего солнечного цикла наиболее значимы при сильном циркумполярном вихре. При этом увеличение потока ГКЛ в минимумах солнечной активности сопровождается интенсификацией циклонов (понижением давления) на полярных фронтах умеренных широт. При слабом вихре эффекты ГКЛ ослабевают и меняют знак. Возможной причиной изменения вклада вариаций ГКЛ в развитие внетропического циклогенеза является, по-видимому, различный характер взаимодействия тропосферы и стратосферы при сильном и слабом вихре.

8) Корреляционные связи, наблюдаемые между нижней облачностью и потоками ГКЛ в умеренных широтах северного и южного полушарий на десятилетней временной шкале, обусловлены эффектами ГКЛ в интенсивности циклонической деятельности. Показано, что положительная корреляция между аномалиями нижней облачности и потоками ГКЛ наблюдалась в период 1983–2000 гг., когда циркумполярные вихри в Арктике и Антарктике были усилены, и увеличение потока ГКЛ сопровождалось интенсификацией циклонических процессов. Возможной причиной нарушения корреляции между облачностью и потоками ГКЛ в начале 2000-х гг. является резкое ослабление циркумполярных вихрей обоих полушарий, что привело к изменению роли ГКЛ в развитии внетропического циклогенеза.

9) Эволюция циркумполярного вихря, формирующегося в стратосфере полярных широт северного и южного полушарий, играет важную роль в формировании долговременных эффектов солнечной активности и галактических космических лучей в тропосферной циркуляции. Изменения состояния вихря являются возможной причиной временной изменчивости корреляционных связей, наблюдаемых между климатическими характеристиками и вариациями СА/ГКЛ.

10) Широтное и высотное расположение области формирования циркумполярного вихря создает благоприятные условия для работы ряда физических механизмов, связанных с

различными гелиогеофизическими факторами (вариациями солнечных и галактических космических лучей, высыпаниями авроральных электронов, вариациями межпланетного магнитного поля). Таким образом, циркумполярный вихрь является, по-видимому, одним из важных связующих звеньев между активными процессами на Солнце и циркуляцией нижней атмосферы.

В Приложении 1 приведен список солнечных протонных событий с энергиями частиц > 90 МэВ.

В Приложении 2 приведена методика проверки статистической значимости коэффициентов корреляции методом рандомизации фаз.

В Приложении 3 приведена методика проверки статистической значимости максимумов спектра Фурье.

Цитируемая литература

- 1) Гудкович З.М. и др. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. №1(81). С.15-23.
- 2) Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ, 1994. 520с.
- 3) Ebisuzaki W. // J. Climate. 1997. V.10. P.2147–2153
- 4) IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. (Eds. Stocker T.F. et al.). Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA. 2013. 1535p.
- 5) Marsh N., Svensmark H. // Phys. Rev. Lett. 2000. V.85. P.5004-5007.
- 6) Shea M.A., Smart D.F. // 18th Intern. Cosmic Ray Conf. Papers. 1983. V.3. P.415-418.
- 7) Stozhkov et al. // Adv. Space Res. 2009. V.44. P.1124-1137.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано **93** научные работы и одна монография. В рецензируемых российских и зарубежных журналах, входящих в перечень ВАК, опубликовано **52** статьи, в сборниках и трудах всероссийских и международных конференций – **41** статья. **50** статей индексируются базами данных SCOPUS и Web of Science. Полный список публикаций в рецензируемых изданиях можно найти в базе ResearchID <http://www.researcherid.com/rid/F-3341-2014>

Монография

Maxim Ogurtsov, Risto Jalkanen, Markus Lindholm, Svetlana Veretenenko “The Sun-Climate Connection Over the Last Millennium. Facts and Questions” (e-ISBN: 978-1-60805-980-5; ISBN: 978-1-60805-981-2 © Bentham Science Publishers Ltd – 2014).

Публикации в журналах, входящих в список ВАК:

1. Pudovkin M.I., Babushkina (Veretenenko) S.V. Influence of solar flares and disturbances of the interplanetary medium on the atmospheric circulation // J.Atm.Terr.Phys. 1992. V.54(7/8). P.841-846.
2. Pudovkin M.I., Babushkina (Veretenenko) S.V. Atmospheric transparency variations associated with geomagnetic disturbances // J.Atm.Terr.Phys. 1992. V.54(9). P.1135-1138.
3. Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Эффекты вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1993. Т.33(6). С.35-40.
4. Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Эффекты форбуш-понижений галактических космических лучей в вариациях общей облачности // Геомагнетизм и аэрномия. 1994. Т.34(4). С.38-44.

5. Pudovkin M.I., Veretenenko S.V. Cloudiness decreases associated with Forbush-decreases of galactic cosmic rays // *J.Atm.Terr.Phys.* 1995. V.57(11). P.1349-1355.
6. 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.* 1996. V.17(11). P.161-164.
7. Pudovkin M.I., Veretenenko S.V., Pellinen R., Kyrö E. Cosmic ray variation effects in the temperature of the high-latitude atmosphere // *Adv. Space Res.* 1996. V.17(11). P.165-168.
8. Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Вариации общей облачности в ходе всплесков солнечных космических лучей // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 1996. Т.36(1). С.153-156.
9. Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Влияние вариации галактических космических лучей на поступление солнечной радиации в нижнюю атмосферу // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 1997. Т.37(2). С.55-60.
10. Пудовкин М.И., Виноградова Н.Я., Веретененко С.В. Вариации прозрачности атмосферы во время всплесков солнечных протонов // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 1997. Т.37(2). С.124-126.
11. Veretenenko S.V., Pudovkin M.I. Effects of the galactic cosmic ray variations on the solar radiation input in the lower atmosphere // *J.Atm.Sol.-Terr.Phys.* 1997. V.59(14). P.1739-1746.
12. Veretenenko S.V., Pudovkin M.I. Cosmic ray variation influence on the total radiation fluxes in the lower atmosphere // *Adv. Space Res.* 1997. V.20(6). P.1173-1176.
13. Pudovkin M.I., Veretenenko S.V., Pellinen R., Kyrö E. Meteorological characteristic changes in the high-latitude atmosphere associated with Forbush-decreases of the galactic cosmic rays // *Adv. Space Res.* 1997. V.20(6). P.1169-1172.
14. Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Вариации прихода суммарной радиации в 11-летнем цикле солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 1998. Т.38(5). С.33-42.
15. Veretenenko S.V., Pudovkin M.I. Variations of solar radiation input to the lower atmosphere associated with different helio/geophysical factors // *J.Atm.Sol.-Terr.Phys.* 1999. V.61(7). P.521-529.
16. Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Широтная зависимость эффектов солнечной активности в вариациях прихода суммарной радиации // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 1999. Т.39(6). С.130-133.
17. Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Вариации прихода суммарной радиации как возможный энергетический источник долгопериодных эффектов солнечной активности в атмосферной циркуляции // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2000. Т.40(1). С.77-83.
18. Veretenenko S.V., Pudovkin M.I. Latitudinal dependence of the helio/geophysical effects on the solar radiation input to the lower atmosphere // *J.Atm.Sol.-Terr.Phys.* 2000. V.62(7). P.567-571.
19. Veretenenko S.V., Pudovkin M.I. Global radiation changes in the lower atmosphere related to solar activity phenomena // *Int. J. Geomagn. Aeron.* 2001. V.2(3). P.225-231.
20. Veretenenko S.V. Influence of helio/geophysical phenomena on the solar radiation input to the lower atmosphere // *Adv. Space Res.* 2003. V.31(4). P.1007-1012.
21. Veretenenko S., Thejll P. Effects of energetic Solar Proton Events on the cyclone development in the North Atlantic // *J.Atmos.Sol.-Terr.Phys.* 2004. V.66(5). P.393-405.
22. Веретененко С.В., Дергачев В.А., Дмитриев П.Б. Долгопериодные изменения приземного давления в Северной Атлантике и их связь с вариациями галактических космических лучей // *Известия РАН. Сер. физ.* 2005. Т.69(6). С.900-903.

23. Veretenenko S.V., Thejll P. Cyclone regeneration in the North Atlantic intensified by energetic solar proton events // *Adv. Space Res.* 2005. V.35(3). P.470-475.
24. Veretenenko S.V., Dergachev V.A., Dmitriyev P.B. Long-term variations of the surface pressure in the North Atlantic and possible associations with solar activity and galactic cosmic rays // *Adv. Space Res.* 2005. V.35(3). P.484-490.
25. Веретененко С.В., Дергачев В.А., Дмитриев П.Б. Влияние солнечной активности и вариаций космических лучей на положение арктического фронта в Северной Атлантике // *Известия РАН. Сер. физ.* 2007. Т.71(7). С.1041-1043.
26. Веретененко С.В., Дергачев В.А., Дмитриев П.Б. Солнечная активность и вариации космических лучей как фактор интенсивности циклонических процессов в умеренных широтах // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2007. Т.47(3). С.399-406.
27. Веретененко С.В., Тайл П. Солнечные протонные события и эволюция циклонов в Северной Атлантике // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2008. Т.48(4). С.542-552.
28. Веретененко С.В., Ивлев Л.С., Ульев В.А. Исследование вариаций стратосферного аэрозоля во время солнечных протонных событий января 2005 г. по данным инструмента GOMOS/ENVISAT // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2008. №3(80). С.126-130.
29. Распопов О.М., Веретененко С.В. Солнечная активность и вариации космических лучей: влияние на облачность и процессы в нижней атмосфере (памяти и к 75-летию М.И. Пудовкина) // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2009. Т.49(2). С.1-9.
30. Веретененко С.В., Дергачев В.А., Дмитриев П.Б. Долгопериодные изменения характеристик высотных фронтальных зон в Северной Атлантике и их связь с солнечной активностью и вариациями космических лучей // *Известия РАН. Сер. физ.* 2009. Т.73(3). С.429-431.
31. 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.* 2010. V.45(3). P.391-397.
32. Artamonova I.V, Veretenenko S.V. Galactic cosmic ray variation influence on baric system dynamics at middle latitudes // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys..* 2011. V.73(2/3). P.366-370.
33. Артамонова И.В., Веретененко С.В. Влияние вариаций галактических космических лучей на динамические процессы в нижней атмосфере // *Вестник СПбГУ.* 2011. Сер.4. Вып.2. С.16-24.
34. Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. Regional and temporal variability of solar activity and galactic cosmic ray effects on the lower atmosphere circulation // *Adv. Space Res.* 2012. V.49(4). P.770-783.
35. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Исследование пространственно-временной структуры долгопериодных эффектов солнечной активности и вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2012. Т.52(5). С.626-638.
36. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Stratospheric polar vortex as a link between solar activity and circulation of the lower atmosphere // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2012. V.52(7). С.937-943.
37. Артамонова И.В., Веретененко С.В. Влияние вариаций солнечных и галактических космических лучей на длительность макросиноптических процессов // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2013. Т.53(1). С.8-12.

38. Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. The stratospheric polar vortex as a cause for the temporal variability of solar activity and galactic cosmic ray effects on the lower atmosphere circulation // IOP Publishing. J. of Phys.: Conf. Ser. 2013. V.409. 012238. doi:10.1088/1742-6596/409/1/012238.
39. Veretenenko S.V., Thejll P. Influence of energetic Solar Proton Events on the development of cyclonic processes at extratropical latitudes // IOP Publishing. J. Phys.: Conf. Ser. 2013. V.409. 012237. doi:10.1088/1742-6596/409/1/012237.
40. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Циркумполярный вихрь как причина временной изменчивости эффектов солнечной активности и галактических космических лучей в циркуляции нижней атмосферы // Известия РАН. Сер. физ. 2013. Т.77(5). С.659-661.
41. Ogurtsov M., Lindholm M., Jalkanen R., Veretenenko S.V. New evidence of solar variation in temperature proxies from Northern Fennoscandia // Adv. Space Res. 2013. V.52(9). P.1647-1654.
42. Veretenenko S., Ogurtsov M. Stratospheric polar vortex as a possible reason for temporal variations of solar activity and galactic cosmic ray effects on the lower atmosphere circulation // Adv. Space Res. 2014. V.54(12). P.2467-2477.
43. Artamonova I., Veretenenko S. Atmospheric pressure variations at extratropical latitudes associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays // Adv. Space Res. 2014. V.54(12). P.2491-2498.
44. Ogurtsov M., Lindholm M., Jalkanen R., Veretenenko S. Evidence for the Gleissberg solar cycle at the high-latitudes of the Northern Hemisphere // Adv. Space Res. 2015. V.55(5). P.1285-1536.
45. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. О возможных причинах нарушения корреляционных связей между состоянием облачности и потоками галактических космических лучей // Известия РАН. Сер. физ. 2015. Т.79(5). С.750-752.
46. Артамонова И.В., Веретененко С.В. Влияние форбуш-понижений галактических космических лучей на развитие антициклонической активности в умеренных широтах // Известия РАН. Сер. физ. 2015. Т.79(5). С.747-749.
47. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Природа долговременных корреляционных связей между состоянием облачности и вариациями потока галактических космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т.55(4). С.457-465.
48. Ogurtsov M., Veretenenko S., Lindholm M., Jalkanen R. Possible solar-climate imprint in temperature proxies from the middle and high latitudes of North America // Adv. Space Res. 2016. V.57(4). P.1112-1117.
49. Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. Cloud anomalies at midlatitudes of the Northern and Southern hemispheres: Connection with atmospheric dynamics and variations in cosmic rays // Geomagnetism and Aeronomy. 2016. V.56. №8. P.1110-1117.
50. Veretenenko S., Ogurtsov M. Cloud cover anomalies at middle latitudes: Links to troposphere dynamics and solar variability // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2016. V.149. P.207-218.
51. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Аномалии нижней облачности в умеренных широтах и их связь с вариациями галактических космических лучей при различных состояниях циркумполярного вихря // Известия РАН. Сер. физ. 2017. Т.81(2). С.266-269.
52. Веретененко С.В. Сравнительный анализ коротковременных эффектов солнечных и галактических космических лучей в эволюции барических систем умеренных широт // Известия РАН. Сер. физ. 2017. Т.81(2). С.281-284.

Прочие публикации

1. Pudovkin M.I, Raspopov O.M., Veretenenko S.V. A possible mechanism for influence of solar activity on the lower atmosphere, weather and climate parameters // 1992 STEP/5th COSPAR Coll. Eds. D. Baker et al. Pergamon Press. 1994. P.575-579.
2. Pudovkin M.I, Veretenenko S.V. On an agent linking solar and geomagnetic disturbances to the state of the lower atmosphere // 1992 STEP/5th COSPAR Coll. Eds. D. Baker et al. Pergamon Press. 1994. P.493-495.
3. Pudovkin M.I., Veretenenko S.V., Pellinen R. Куро Е. Influence of solar cosmic ray bursts on the temperature of the high-latitude atmosphere // J. Technic. Phys. 1995. V.36 (4). P.433-443.
4. Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Изменение годового поступления солнечной радиации в связи с вариациями галактических космических лучей в 11-летнем цикле солнечной активности // “Современные проблемы солнечной цикличности”. Труды конференции, посвященной памяти М.Н. Гневышева и А.И. Оля. (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 26-30 мая 1997 г.). СПб: ПИЯФ. 1997. С.28-32.
5. Pudovkin M.I., Veretenenko S.V. Helio-magnetospheric disturbances and the state of the lower atmosphere // Problems of Geospace 2. Proceedings of the International Conference “Problems of Geospace” (St.Petersburg, Petrodvorets, June 29 - July 3, 1998). Eds. Semenov V.S. et al. Austrian Academy of Sciences, Vienna, 1999. P.21-38.
6. Veretenenko S.V., Pudovkin M.I. Changes of solar radiation input in the lower atmosphere associated with different cosmophysical phenomena // Problems of Geospace 2. Proceedings of the International Conference “Problems of Geospace” (St.Petersburg, Petrodvorets, June 29 - July 3, 1998). Eds. Semenov V.S. et al. Austrian Academy of Sciences, Vienna, 1999. P.373-378.
7. Veretenenko S.V., Pudovkin M.I. Variations of solar radiation input as a possible energy source of the solar activity effects on the lower atmosphere circulation // Problems of Geospace 2. Proceedings of the International Conference “Problems of Geospace” (St.Petersburg, Petrodvorets, June 29–July 3, 1998). Eds. Semenov V.S. et al. Austrian Academy of Sciences, Vienna, 1999. P.379-384.
8. Веретененко С.В. Влияние гелиогеофизических факторов на поступление солнечной радиации в нижнюю атмосферу // “Естественные и антропогенные аэрозоли”. II Международная конференция (Санкт-Петербург, Петродворец, 27 сентября - 1 октября 1999 г.). СПб. 2000. С.204-208.
9. Veretenenko S.V. Effects of helio/geophysical phenomena related to solar activity on the global radiation fluxes in the lower atmosphere // “IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation” (Eds. W.L.Smith and Yu.M.Timofeev). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 2001. P.582-585.
10. Veretenenko S.V., Thejll P. Effects of solar cosmic ray bursts on the meteorological characteristics of the lower atmosphere in the North Atlantic // “Активные процессы на Солнце и в звездах”. Труды научной конференции стран СНГ и Прибалтики (Санкт-Петербург, 1-6 июля 2002 г.). Ред. Зайцев В.В. и Яснов Л.В. Санкт-Петербург. 2002. С.152-155.
11. Веретененко С.В., Дергачев В.А., Дмитриев П.Б. Долгопериодные эффекты космических лучей в вариациях приземного давления в Северной Атлантике // “Климатические и экологические аспекты солнечной активности”. Труды VII Пулковской международной

конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 7-11 июля 2003 г.) СПб: ГАО РАН. 2003. С.71-76.

12. Veretenenko S.V., Thejll P. Influence of solar cosmic ray bursts on the cyclone evolution in the North Atlantic // “Климатические и экологические аспекты солнечной активности”. Труды VII Пулковской международной конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 7-11 июня 2003 г.). СПб: ГАО РАН. 2003. С. 77-82.

13. Veretenenko S.V., Thejll P. Effects of energetic solar proton events on the cyclone regeneration in the North Atlantic // Proceedings of the 5th International Conference “Problems of Geocosmos”, (St.Petersburg, Petrodvorets, May 24-28 2004). Eds. A.A. Kovtun et al. SPb. 2004. P.384-388.

14. Веретененко С.В., Артамонова И.В. Влияние форбуш-понижений галактических космических лучей на интенсивность циклонических процессов в умеренных и высоких широтах // “Солнечная активность как фактор космической погоды”. Труды IX Пулковской международной конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 4-9 июля 2005 г.). СПб: ГАО РАН. 2005. С.11-16.

15. Веретененко С.В., Дергачев В.А., Дмитриев П.Б. Влияние арктического фронта на формирование долгопериодных эффектов солнечной активности в вариациях приземного давления в Северной Атлантике // “Солнечная активность как фактор космической погоды”. Труды IX Пулковской международной конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 4-9 июля 2005 г.). СПб: ГАО РАН. 2005. С.17-22.

16. Веретененко С.В., Тайл П. Усиление регенерации циклонов в Северной Атлантике в связи со всплесками солнечных космических лучей // “Солнечная активность как фактор космической погоды”. Труды IX Пулковской международной конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 4-9 июля 2005 г.). СПб: ГАО РАН. 2005. С.23-28.

17. Veretenenko S.V., Thejll P. Effects of cosmic ray variations on the cyclone development in the North Atlantic // Proceedings of the 6th International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Petrodvorets, 23-27 May 2006). Eds. V.N. Troyan et al. SPb. 2006. P.198-205.

18. Veretenenko S.V., Dergachev V.A., Dmitriyev P.B. Long-term changes of extratropical cyclogenesis and possible associations with solar activity and galactic cosmic ray variations // Proceedings of the 6th International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Petrodvorets, 23-27 May 2006). Eds. V.N. Troyan et al. SPb. 2006. P.194-197.

19. Веретененко С.В. Роль фронтальных зон в формировании эффектов солнечной активности в вариациях интенсивности циклогенеза умеренных широт // “Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений”. Труды XI Пулковской международной конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2-7 июля 2007 г.). СПб: ГАО РАН. 2007. С.81-84.

20. Веретененко С.В., Софиева В.Ф., Ивлев Л.С, the GOMOS team. Вариации концентрации стратосферного аэрозоля в ходе солнечных протонных событий января 2005 года по данным GOMOS // “Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений”. Труды XI Пулковской международной конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 2-7 июля 2007 г.). СПб: ГАО РАН. 2007. С.85-88.

21. Raspopov O.M., Veretenenko S.V. Solar activity, cosmic rays and climate change (on the 75th anniversary and in memory of Prof. M.I. Pudovkin) // Proceedings of the 7th International Conference

“Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Petrodvorets, May 26-30, 2008). Eds. V.N. Troyan et al. SPb. 2008. P.235-242.

22. Veretenenko S.V., Dergachev V.A., Dmitriyev P.B. Solar activity effects on the characteristics of frontal zones in the North Atlantic // Proceedings of the 7th International Conference “Problems of Geocosmos”(St.Petersburg, Petrodvorets, May 26-30, 2008). Eds. V.N. Troyan et al. SPb.2008. P.288-293.

23. Artamonova I.V., Veretenenko S.V. Baric system dynamics during Forbush-decreases of galactic cosmic rays // Proceedings of the 7th International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Petrodvorets, May 26-30, 2008). Eds V.N. Troyan et al. SPb. 2008. P.7-11.

24. Веретененко С.В. Долгопериодные вариации эффектов солнечной активности в атмосферной циркуляции умеренных и высоких широт // “Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика–2009”. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 5-11 июля 2009 г.). СПб: ГАО РАН. 2009. С.101-102.

25. Артамонова И.В., Веретененко С.В. Влияние короткопериодных вариаций интенсивности космических лучей на эволюцию барических систем умеренных и высоких широт // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика –2009” (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 5-11 июля 2009 г.). СПб: ГАО РАН. 2009. С.33-34.

26. Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. Long-term variations of solar activity effects on the atmospheric circulation” / В: “Циклы активности на Солнце и звездах”. Ред. В.Н. Обридко и Ю.А. Наговицын. СПб: Изд-во ВВМ. 2009. С.241-250.

27. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. О возможных причинах пространственно-временной изменчивости эффектов солнечной активности в циркуляции нижней атмосферы // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика–2010”. (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 3-9 октября 2010 г.). СПб: ГАО РАН. 2010. С.79-82.

28. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Пространственно-временные вариации эффектов солнечной активности и галактических космических лучей в циркуляции нижней атмосферы. Электронный сборник трудов 31-й Всероссийской конференции по космическим лучам, 5-9 июля 2010 г. Москва. 2010.

29. Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. Long-term variability of solar activity and cosmic ray effects on the lower atmosphere circulation // Proceedings of the 8th International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Petrodvorets, September 20-24, 2010). Ed. V.S. Semenov. SPb. 2010. P.268-273.

30. Artamonova I.V., Veretenenko S.V. Cosmic ray variation influence on the duration of elementary synoptic processes” // Proceedings of the 8th International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Petrodvorets, September 20-24, 2010). Ed. V.S. Semenov. SPb. 2010. P.13-16.

31. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Стратосферный циркумполярный вихрь как связующее звено между солнечной активностью и циркуляцией нижней атмосферы // “Солнечная и солнечно-земная физика –2011”. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 3-7 октября 2011 г.). СПб: ГАО РАН. 2011. С.317-320.

32. Артамонова И.В., Веретененко С.В. Связь длительности макросиноптических процессов с вариациями потоков космических лучей // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XII конференции молодых ученых “Взаимодействие полей и излучения с веществом”. Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН. 2011. С.311-313.
33. Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. The polar vortex evolution as a possible reason for the temporal variability of solar activity effects on the lower atmosphere circulation // Proceedings of the 9th International Conference “Problems of Geocosmos” (St.Petersburg, Petrodvorets, October 8-12, 2012). Eds. V.N. Troyan et al. SPb. 2012. P.416-421.
34. Veretenenko S.V., Thejll P. Variations of extratropical cyclonic activity in the Northern and Southern hemispheres associated with energetic solar proton events // Proceedings of the 9th International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Petrodvorets, October 8-12, 2012). Eds. V.N. Troyan et al. SPb. 2012. P.422-427.
35. Artamonova I.V., Veretenenko S.V. Atmospheric pressure variations at high latitudes associated with Forbush decreases of cosmic rays // Proceedings of the 9th International Conference “Problems of Geocosmos” (St.Petersburg, Petrodvorets, October 8-12, 2012). Eds. V.N. Troyan et al. SPb. 2012. P.188-192.
36. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Роль стратосферного циркумполярного вихря в формировании долгопериодных эффектов солнечной активности и галактических космических лучей в тропосферной циркуляции // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика–2013”(Санкт-Петербург, ГАО РАН, 25-27 сентября 2013 г.). СПб: ГАО РАН. 2013. С.39-42.
37. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Нарушение корреляции между аномалиями нижней облачности и потоками галактических космических лучей и его возможные причины // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика–2014” (Санкт-Петербург, ГАО РАН, 20-25 октября 2014 г.), СПб: ГАО РАН. 2014. С.71-74.
38. Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. Possible reasons for the correlation reversal between low clouds and galactic cosmic rays // Proceedings of the 10th International Conference “Problems of Geocosmos” (St.Petersburg, Petrodvorets, October 6-10, 2014). Ed. by V.N. Troyan et al. 2014. P.416-421.
39. Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. Low Clouds and Cosmic Rays: Possible Reasons for Correlation Changes // Sun and Geosphere. Special edition: 6th Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere” (Sunny Beach, Bulgaria, 26-20 May 2014). 2015. V.10(1). P.51-58.
40. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Аномалии облачности в умеренных широтах северного и южного полушарий: связь с динамикой атмосферы и вариациями космических лучей // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика–2015”(Санкт-Петербург, ГАО РАН, 5-9 октября 2015 г.). СПб: ГАО РАН. 2015. С.47-50.
41. Веретененко С.В. Влияние солнечных протонных событий на развитие циклонических процессов в умеренных широтах // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика–2015”(Санкт-Петербург, ГАО РАН, 5-9 октября 2015 г.). СПб: ГАО РАН. 2015. С.43-46.