

УДК 551.590.2

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНЫХ И ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ МАКРОСИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

© 2013 г. И. В. Артамонова¹, С. В. Веретененко²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург

e-mail: artamonova@hotmail.ru

Поступила в редакцию 18.07.2011 г.

После доработки 26.12.2011 г.

Проведено исследование влияния вариаций солнечных и галактических космических лучей на длительность элементарных синоптических процессов (ЭСП) в атлантико-европейском секторе северного полушария. Обнаружено, что всплески солнечных космических лучей (СКЛ) приводят к увеличению длительности ЭСП, относящихся к западной и меридиональной формам атмосферной циркуляции. Форбуш-понижения галактических космических лучей (ГКЛ) сопровождаются увеличением длительности ЭСП, относящихся к меридиональной форме атмосферной циркуляции и уменьшением длительности ЭСП, относящихся к западной и восточной формам. Сделано предположение, что наблюдаемые изменения длительности ЭСП обусловлены влиянием короткопериодных вариаций космических лучей на интенсивность циклонических процессов в умеренных и высоких широтах, а именно: с регенерацией циклонов у юго-восточного побережья Гренландии после всплесков СКЛ и развитием блокирующих антициклонов над северо-востоком Атлантики, Европой и Скандинавией в ходе форбуш-понижений ГКЛ.

DOI: 10.7868/S0016794013010033

1. ВВЕДЕНИЕ

Долгосрочный прогноз погоды основан на анализе вариаций типов и длительности макросиноптических процессов. Согласно классификации, предложенной российским метеорологом Г.Я. Вангенгеймом [Вангенгейм, 1952], все многообразие макросиноптических процессов можно разделить на 26 типов, которые, в зависимости от формы атмосферной циркуляции, в свою очередь принято объединять в 3 основные группы: западную (W), меридиональную (С) и восточную (Е). В основу разделения Вангенгеймом было положено совпадение распределения дирижирующих полей давления и характера процессов их формирования, а также схожесть ориентировки господствующих ветровых систем и направления основных вторжений воздушных масс. Данная классификация характеризует непрерывную последовательность макросиноптических процессов, каждый из которых представляет собой “естественный отрезок времени”, в течение которого сохраняется положение основных барических систем и направление основных воздушных потоков над атлантико-европейским сектором северного полушария. Такие “естественные отрезки времени” были названы элементарными синоптическими процессами (ЭСП). Средняя продолжительность ЭСП составляет, как правило, 3–5 дней.

Типизация, предложенная Г.Я. Вангенгеймом [Вангенгейм, 1952, 1964; Гирс, 1960, 1974], позволяет учесть основные особенности макросиноптических процессов над атлантико-европейским сектором, рассмотреть их в непрерывном развитии, а также характеризует циркуляционный фон всего северного полушария. В периоды развития западной формы атмосферной циркуляции (W) изогипсы принимают почти зональное распределение по всему северному полушарию, и происходит усиление западно-восточного переноса во всей толще тропосферы. Межширотный обмен воздушными массами ослаблен. В высоких широтах у поверхности земли в эти периоды развивается область низкого давления, а в умеренных и субтропических широтах — область высокого давления. Восточная форма атмосферной циркуляции (Е) характеризуется формированием в тропосфере устойчивых волн большой амплитуды и усилением межширотного воздухообмена. Над континентами в эти периоды развиваются стационарные антициклоны, которые нарушают западно-восточный перенос воздушных масс и барических образований и поэтому получили название блокирующих центров. В Тихом и Атлантическом океанах при этом сохраняются значительные зональные составляющие. Для меридиональной формы атмосферной циркуляции (С), также как и для

восточной, характерно формирование устойчивых стационарных волн большой амплитуды и усиление межширотного воздухообмена. В данном случае формирование высокого теплого антициклона происходит над восточной частью Атлантики и западной Европой, при этом наблюдается заполнение исландского и алеутского минимумов. Таким образом, по мере развития западной формы (W) отмечается прогрессивный рост градиентов давления и температуры в направлении с юга на север, усиление зональной циркуляции атмосферы и ослабление межширотного воздухообмена. Для меридиональной (С) и восточной (Е) форм характерно развитие волн большой амплитуды и барических образований, блокирующих западно-восточный перенос, что приводит к усилению меридиональной циркуляции и более интенсивному межширотному воздухообмену.

Исследования эволюции указанных форм атмосферной циркуляции в связи с различными проявлениями солнечной активности представляют большой интерес как для выяснения физического механизма солнечно-земных связей, так и для улучшения качества метеорологических прогнозов. Изучение зависимости интенсивности зональной циркуляции атмосферы от вариаций потоков космических лучей проведено в работе [Веретененко и Пудовкин, 1993]. В результате исследования временного хода индекса Блинковой (который является характеристикой интенсивности зональной циркуляции атмосферы) в связи с вариациями потоков космических лучей авторами было обнаружено ослабление зональной циркуляции на изобарическом уровне 500 гПа во время форбуш-понижений ГКЛ и ее усиление после всплесков СКЛ с энергиями $E_p > 90$ МэВ. Также имеется ряд работ, в которых указывается на связь интенсивности и времени жизни барических образований в атлантико-европейском секторе северного полушария с кратковременными вариациями потоков солнечных и галактических космических лучей. В частности, обнаружено усиление регенерации североатлантических циклонов у юго-восточного побережья Гренландии после всплесков СКЛ с энергиями протонов $E_p > 90$ МэВ [Veretenenko and Thejll, 2004, 2005]. В работе [Artamonova and Veretenenko, 2011] показано, что форбуш-понижения ГКЛ, как правило, сопровождаются более интенсивным развитием блокирующих антициклонов над северо-востоком Атлантики, Европой и Скандинавией. Это позволило предположить, что вариации космических лучей могут влиять также и на длительность ЭСП, связанных с формированием и развитием барических образований, характерных для той или иной формы атмосферной циркуляции. В настоящей работе проводится исследование зависимости длительности ЭСП от короткопериодных вариаций потоков солнечных и галактических космических лучей.

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для данного исследования было отобрано 48 форбуш-понижений космических лучей с амплитудой $\delta N/N > 2.5\%$ по данным нейтронного монитора ст. Апатиты (67° N, 33° E) за период 1980–2006 гг. Одним из важных критериев отбора было отсутствие всплесков солнечных протонов с интенсивностью $I_p > 100$ протон $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ для частиц с энергиями $E_p > 10$ МэВ на интервале ± 3 дня относительно начала форбуш-понижения, согласно методике, предложенной в работе [Pudovkin and Veretenenko, 1995]. Список из 48-ми интенсивных солнечных протонных событий (СПС) с энергиями частиц $E_p > 90$ МэВ за период 1980–1995 гг. был взят из работы [Veretenenko and Thejll, 2005]. Отбор как форбуш-понижений, так и солнечных протонных событий производился за холодный период (октябрь–март), поскольку в это время года наблюдается усиление процессов циклогенеза, обусловленное максимальными температурными контрастами в приземном слое атмосферы [например, [Воробьев, 1991; Матвеев, 2005]].

Ранее было показано, что реакция атмосферы на всплеск СКЛ (падение давления) максимально проявляется на 1-й–2-ой день после начала всплеска [Veretenenko and Thejll, 2005]. Отклик атмосферы на форбуш-понижение космических лучей (рост давления) максимален на 3-й–4-ый день после начала события [Pudovkin et al. 1997; Artamonova and Veretenenko, 2011]. С учетом результатов данных исследований, нами были отобраны такие ЭСП, для которых влияние возмущающих факторов начиналось в первый или второй день от начала данного синоптического процесса. Если же форбуш-понижение или всплеск СКЛ приходились на конец ЭСП (последний или предпоследний дни), то к рассмотрению принимался следующий за этим период. Данные по ЭСП были взяты из каталога макросиноптических процессов под редакцией Вангенгейма, ведение которого начато в 1964 году и продолжается до сих пор [Вангенгейм, 1964].

Таким образом, было проанализировано 48 ЭСП, происходивших на фоне форбуш-понижений ГКЛ, и 48 ЭСП, в ходе которых наблюдались всплески СКЛ с энергиями $E_p > 90$ МэВ. Для данных ЭСП были построены гистограммы частоты повторяемости их длительности во время вариаций потоков космических лучей. Полученные гистограммы для элементарных синоптических процессов, относящихся к западной (W), меридиональной (С) и восточной (Е) формам атмосферной циркуляции представлены на рис. 1 и рис. 2. На графики также нанесены гистограммы длительности ЭСП для указанных форм циркуляции при невозмущенных условиях, т.е. в отсутствии вариаций космических лучей.

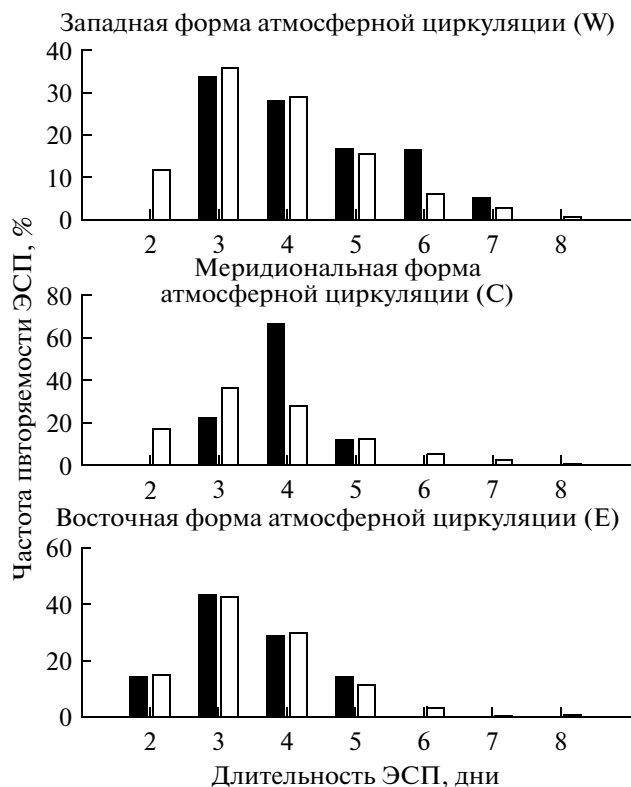


Рис. 1. Распределение длительности ЭСП, относящихся к основным формам атмосферной циркуляции, во время всплесков СКЛ с энергиями частиц $E_p > 90$ МэВ, холодное полугодие (октябрь–март) 1980–1995 гг. (черные столбцы). Распределение длительности ЭСП при невозмущенных условиях в холодное полугодие (белые столбцы).

Построение гистограмм распределения длительности ЭСП при невозмущенных условиях было проведено с использованием метода Монте-Карло. Поскольку время атмосферного отклика на явления, связанные с солнечной активностью, может варьироваться от 2-х–3-х дней в случае солнечных протонных событий [Veretenenko and Thejll, 2004, 2005] до 5-ти–6-ти дней в случае форбуш-понижений ГКЛ [Pudovkin et al., 1997; Artamonova and Veretenenko, 2011], из списка, включающего в себя все дни за холодное полугодие (октябрь–март) 1980–2006 гг., нами были исключены периоды возмущающего влияния галактических космических лучей (длительностью 6 дней) и солнечных космических лучей (длительностью 3 дня) после начала событий. Из оставшегося списка было сгенерировано 1000 выборок по 48 случайных ключевых дат в каждой. Далее на основании данных указанного выше каталога макросиноптических процессов были выбраны ЭСП, соответствующие этим ключевым датам, и построено распределение их длительности.

Из рисунков 1 и 2 можно видеть, что как в невозмущенных условиях, так и в ходе вариаций по-

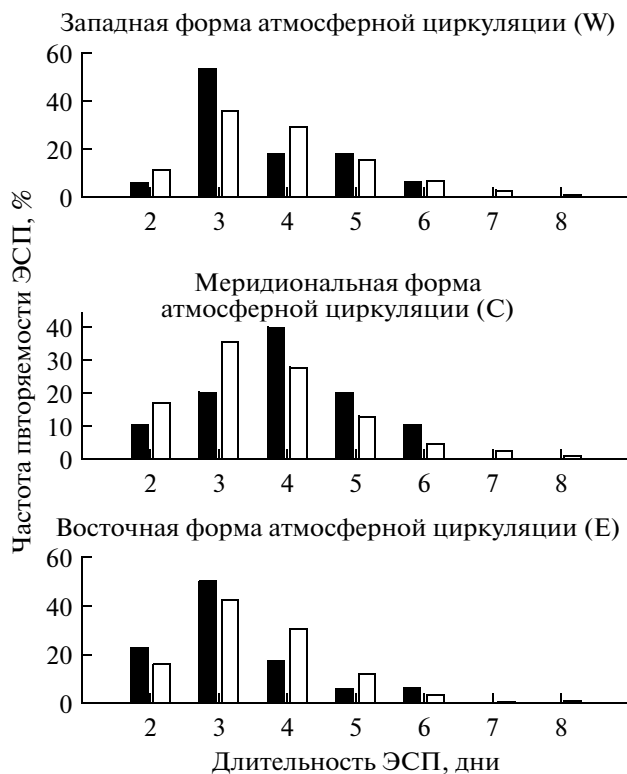


Рис. 2. Распределение длительности ЭСП, относящихся к основным формам атмосферной циркуляции, во время форбуш-понижений ГКЛ, холодное полугодие (октябрь–март) 1980–2006 гг. (черные столбцы). Распределение длительности ЭСП при невозмущенных условиях в холодное полугодие (белые столбцы).

токов космических лучей ~65–80% ЭСП имеют продолжительность 3–4 дня. Однако в присутствии возмущающего влияния космических лучей форма их распределения несколько меняется. В частности, солнечные протонные события сопровождаются увеличением числа более длительных ЭСП, относящихся к западной (W) и меридиональной (C) формам атмосферной циркуляции. В случае западной формы циркуляции наблюдается увеличение числа ЭСП длительностью 5–7 дней, уменьшение числа ЭСП длительностью 3–4 дня и отсутствие ЭСП длительностью 2 дня по сравнению с невозмущенными условиями. Для меридиональной формы циркуляции резко возрастает количество ЭСП длительностью 4 дня, уменьшается число ЭСП длительностью 3 дня и полностью отсутствуют ЭСП длительностью 2 дня. При этом продолжительность макросиноптических процессов, относящихся к восточной форме циркуляции (E), во время СПС практически остается неизменной.

Во время форбуш-понижений космических лучей происходит увеличение числа более коротких ЭСП, принадлежащих к западной (W) и восточной

(Е) формам циркуляции, и увеличение числа более длительных ЭСП, относящихся к меридиональной форме циркуляции (С). Для западной формы циркуляции наблюдается значительный рост числа ЭСП длительностью 3 дня и уменьшение числа ЭСП длительностью 2 и 4 дня. Меридиональная форма циркуляции в этом случае характеризуется смещением максимума распределения длительности ЭСП с 3-х до 4-х дней, уменьшением числа элементарных синоптических процессов продолжительностью 2–3 дня и ростом числа ЭСП длительностью 5–6 дней. Для восточной формы циркуляции происходит увеличение числа ЭСП длительностью 2–3 дня и уменьшение числа ЭСП продолжительностью 4–6 дней. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о заметном влиянии вариаций космических лучей на длительность элементарных синоптических процессов.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдаемые вариации продолжительности элементарных синоптических процессов в ходе солнечных протонных событий и форбуш-понижений могут быть связаны с влиянием потоков космических лучей на динамические процессы в нижней атмосфере. Действительно, развитие западной формы атмосферной циркуляции (W) характеризуется усилением западно-восточного переноса воздушных масс, а также усилением градиентов давления между высокими и средними широтами северного полушария. Такому распределению барических полей соответствует усиление циклогенеза в высоких широтах и интенсивное движение сформировавшихся циклонов в зональном потоке. Ранее была обнаружена регенерация североатлантических циклонов у юго-восточного побережья Гренландии в связи со всплесками СКЛ с энергиями протонов $E_p > 90$ МэВ [Veretenenko and Thejll, 2004, 2005]. Таким образом, увеличение длительности ЭСП западной формы (W), наблюдающееся после солнечных протонных событий может быть обусловлено увеличением интенсивности (амплитуды) и времени жизни североатлантических циклонов. Увеличение продолжительности ЭСП, относящихся к меридиональной (С) форме атмосферной циркуляции, может быть связано с влиянием форбуш-понижений, следующих за солнечными протонными событиями.

С другой стороны, развитие меридиональной формы атмосферной циркуляции (С) характеризуется формированием волн большой амплитуды и усилением межширотного воздухообмена. При этом развитие высокого теплого антициклона происходит над восточной частью Атлантики и западной Европой, также наблюдается заполнение исландского и алеутского минимумов. В работе [Artamonova and Veretenenko, 2011] было об-

наружено более интенсивное формирование антициклонов в ходе форбуш-понижений ГКЛ над северо-востоком Атлантики, Европой и Скандинавией. При невозмущенных условиях блокирующие антициклоны возникают в 43% случаев, тогда как при возмущающем влиянии форбуш-понижений ГКЛ они возникают в 67% случаев. Данные антициклоны занимают стационарное положение, не смещаются в зональном потоке и блокируют перенос воздушных масс по направлению с Атлантики на континент. Подобное распределение барических полей, наблюдаемое в ходе форбуш-понижений ГКЛ, может способствовать увеличению продолжительности ЭСП, относящихся к меридиональной (С) форме атмосферной циркуляции. Также форбуш-понижения космических лучей сопровождаются заполнением исландского минимума [Artamonova and Veretenenko, 2011], что совместно с формированием блокирующего антициклона способствует ослаблению циклогенеза, а также приводит к снижению интенсивности западно-восточного переноса и зональной циркуляции над Северной Атлантикой. Как следствие, уменьшается длительность макросиноптических процессов, относящихся к западной (W) и восточной (E) формам атмосферной циркуляции, для которых характерно развитие области низкого давления и значительные зональные составляющие в северо-атлантическом секторе. Таким образом, наблюдаемые вариации продолжительности ЭСП во время солнечных протонных событий и форбуш-понижений космических лучей могут быть связаны с влиянием последних на эволюцию и время жизни барических образований (циклонов и антициклонов) в указанных регионах.

Важную роль в процессах формирования и развития циклонов и антициклонов играют адвективные изменения температуры [например, [Воробьев, 1991; Матвеев и Матвеев, 2005]. Адвекция холода приводит к формированию или усилению циклонического вихря, адвекция тепла – к формированию или усилению антициклонического. В связи с этим возможной причиной более интенсивного формирования циклонов после солнечных протонных событий и антициклонов в ходе форбуш-понижений космических лучей может быть усиление адвекции холода/тепла, необходимое для развития или регенерации соответствующего барического образования. В работах [Веретененко, 2007; Веретененко и Тайл, 2008] показано, что подобные усиления адвекции температуры в связи с вариациями потоков космических лучей наблюдаются в районах расположения основных климатических фронтов, для которых характерно интенсивное формирование циклонов и антициклонов.

Усиление адвекции температуры и, как следствие, изменение структуры термобарического поля нижней атмосферы, в свою очередь, могут

быть вызваны вариациями облачности в ходе возмущений потоков космических лучей. В настоящее время рассматриваются два возможных физических механизма влияния космических лучей на вариации облачности в нижней атмосфере. Физический механизм, предложенный Дикинсоном [Dickinson, 1975] связан непосредственно с ионизацией верхних слоев тропосферы космическими лучами. Согласно другой гипотезе [Tinsley, 2008; Tinsley and Yu, 2004; Tinsley, 2008], проводимость атмосферы модулируется космическими лучами и, как следствие, варьируется интенсивность токов в глобальной токовой цепи, что также может приводить к изменению скорости облакообразования.

4. ВЫВОДЫ

Результаты проведенного исследования показывают, что вариации солнечных космических лучей с энергиями $E_p > 90$ МэВ и галактических космических лучей с энергиями $E \sim 1-10$ ГэВ могут оказывать заметное влияние на продолжительность ЭСП. Обнаруженные вариации длительности ЭСП в случае солнечных протонных событий обусловлены регенерацией североатлантических циклонов во время всплесков СКЛ. Вариации длительности ЭСП в ходе форбуш-понижений ГКЛ связаны с развитием стационарных блокирующих антициклонов над Северной Атлантикой, Скандинавией и/или Северной Европой. Полученные результаты можно использовать для повышения качества метеорологических прогнозов, основанных на анализе типа и длительности макросиноптических процессов.

Авторы выражают благодарность зав. лабораторией долгосрочных метеорологических прогнозов ААНИИ В.В. Иванову и сотруднику отдела геофизики ААНИИ В.А. Ульеву за предоставление необходимой литературы и полезную дискуссию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гирс А.А. Основы долгосрочных прогнозов погоды // Л.: Гидрометеоздат, 560 с. 1960.
- Гирс А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов // Л.: Гидрометеоздат, 488 с. 1974.
- Вангенгейм Г.Я. Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики // Тр. Арктического научно-исслед. ин-та. Т. 34. 314 с. 1952.
- Вангенгейм Г.Я., Гирс А.А. Каталог макросиноптических процессов по классификации Г.Я. Вангенгейма // Л.: Изд-во ААНИИ, ... с. 1964.
- Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Эффекты вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 6. С. 35–40. 1993.
- Веретененко С.В. Роль фронтальных зон в формировании эффектов солнечной активности в вариациях интенсивности циклогенеза умеренных широт // Тр. XI Пулковской междунар. конф. по физике Солнца. СПб. С. 81–84. 2007.
- Веретененко С.В., Тайл П. Солнечные протонные события и эволюция циклонов в северной Атлантике // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 4. С. 542–552. 2008.
- Воробьев В.И. Синоптическая метеорология // Л.: Гидрометиздат, 616 с. 1991.
- Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л. Облака и вихри – основа колебаний погоды и климата // Санкт-Петербург: РГГМУ. 327 с. 2005.
- Artamonova I.V., Veretenenko S.V. Galactic cosmic ray variation influence on baric system dynamics at middle latitudes // J. Atmos. Solar.–Terr. Phys. V. 73. № 2–3. P. 366–370. 2011.
- Dickinson R.E. Solar variability and the lower atmosphere // Bull. Am. Meteorol. Soc. V. 56. P. 1240–1248. 1975.
- Pudovkin M.I., Veretenenko S.V., Pellinen R., Kyro E. Meteorological characteristic changes in the high-latitude atmosphere associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays // Adv. Space Res. V. 20. № 6. P. 1169–1172. 1997.
- Pudovkin M.I., Veretenenko S.V. Cloudiness decreases associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays // J. Atmos. Solar.–Terr. Phys. V. 57. № 11. P. 1349–1355. 1995.
- Tinsley B.A. Influence of solar wind on the global electric current, and inferred effects on cloud microphysics, temperature and dynamics in the troposphere // Space Sci. Rev. V. 94. P. 231–258. 2000.
- Tinsley, B.A. The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics // Rep. Prog. Phys., V. 71. № 6. P. 66801–66900. 2008.
- Tinsley B.A., Yu F. Atmospheric ionization and clouds as links between solar activity and climate / Solar variability and its effects on the Earth's atmosphere and climate system. Eds. Pap J.M., Fox P., Frohlich C., Hudson H.S., Kuhn J., Mc Cormack J., North J., Sprigg W., Wu S.T. Washington, D.C.: AGU. V. 141. P. 321–339. 2004. doi:10. 1029/GM141.
- Veretenenko S.V., Thejll P. Effects of energetic solar proton events on the cyclone development in the North Atlantic // J. Atmos. Solar.–Terr. Phys. V. 66. P. 393–405. 2004.
- Veretenenko S.V., Thejll P. Cyclone regeneration in the North Atlantic intensified by energetic solar proton events // Adv. Space Res. V. 35. № 3. P. 470–475. 2005.