

УДК 550.388.9:523.91+550.388.9:551.5

## ЗАВИСИМОСТЬ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ОТ ПРОЦЕССОВ НА СОЛНЦЕ И В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

© 2003 г. А. Д. Сытинский, В. Н. Боков, Д. А. Оборин

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, С.-Петербург

e-mail: vnb@aari.nw.ru

Поступила в редакцию 25.07.2001 г.

После доработки 21.03.2002 г.

Приведены результаты исследований геоэффективности параметров солнечного ветра при изучении солнечно-атмосферных связей. Показано, что наиболее геоэффективным параметром является концентрация протонов  $n_{\max}$ . Знак реакций атмосферы, на приход возмущенного солнечного ветра ( $n_{\max}$ ), зависит от полярности ММП. Энергия такого возмущения атмосферы соответствует энергии циклонов и, следовательно, оказывает влияние на погоду. Рассматривается возможный механизм солнечно-атмосферных связей.

Приведенные данные указывают на то, что вариации атмосферной циркуляции в определенной мере обуславливаются процессами, возникающими на Солнце и в межпланетной среде.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании солнечно-атмосферных связей существует проблема выбора гелиофизических данных, которые бы отражали параметры физических процессов, а не их признаки. Дело в том, что большинства индексов солнечной активности были введены только для характеристики видимых событий на Солнце, без учета всего многообразия физических процессов на нем и в межпланетной среде. Вероятно, именно через возмущенное состояние последней и осуществляется влияние солнечной активности на циркуляцию атмосферы Земли и другие гелиогеофизические явления [1–3]. Указанные трудности, очевидно, и являются основной причиной различного рода неопределенностей в результатах исследований солнечно-атмосферных связей [4–6]. Сложилось мнение, что главным индикатором воздействия солнечной активности на земные процессы являются магнитные бури, и что именно через них солнечная активность влияет на атмосферные процессы. Поэтому геомагнитные бури рассматривались как главные реперы при исследовании солнечно-атмосферных связей [5]. Это отразилось на разработках механизмов солнечно-атмосферных связей и, главным образом, на оценке энергетических возможностях солнечной активности, так как энергия магнитных бурь на несколько порядков меньше таких атмосферных явлений, как циклон.

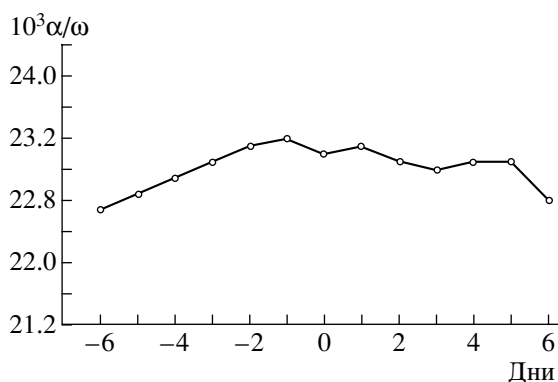
Следует также заметить, что на основании простого сопоставления интенсивности различных видов солнечного излучения, при разработке физических и прогностических моделей атмосферы, практически не учитываются процессы в

межпланетной среде и переменное солнечное излучение, обусловленное солнечной активностью. Считается, что влияния этих процессов на нижнюю атмосферу слабы и поэтому ими можно пренебречь. Однако совершенно очевидно, что любая физическая модель атмосферы должна включать в себя все виды солнечного излучения, а также вариации их интенсивности и различные условия поглощения. При этом не учет того или иного вида излучения должен быть строго физически обоснован. Простые сравнения интенсивности различных видов солнечного излучения не могут быть при этом достаточным критерием, так как диапазон энергии различных атмосферных процессов, определяющих погоду, слишком широк (тайфуны  $\approx 10^{22}$  эрг, циклоны  $\approx 10^{26}$  эрг). Таким образом, пока не существует строгого представления о геоэффективности процессов на солнце и в межпланетном пространстве, определяющих солнечно-атмосферные связи.

В настоящей работе поставлена цель – выявить геоэффективные параметры солнечного ветра при изучении солнечно-атмосферных связей с учетом результатов [2–3] и их детализацией, а также рассмотреть возможные механизмы такой связи.

### 2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

При изучении солнечно-атмосферных связей существует также трудности при выборе индексов или параметров, характеризующих динамику атмосферных процессов. Однако, можно полагать, что солнечная активность и солнечный ве-



**Рис. 1.** Распределение средних значений индекса зональной циркуляции атмосферы (700 гПа) относительно дат геомагнитных возмущений с  $A_p \geq 40$  за 1963–1975 гг. (127 случаев).

тер прежде всего влияют на общую, глобальную циркуляцию атмосферы.

Поступление лучистой энергии Солнца на различные области Земли зависит от высоты или склонения Солнца. Тепловое равновесие атмосферы при данном условии поддерживается общей циркуляцией атмосферы, определяемой температурным градиентом между полюсом и экватором  $dt/d\phi$ , возникающим за счет неодинакового поступления лучистой энергии Солнца на поверхность Земли. Суть общей циркуляции состоит в том, что наличие  $dt/d\phi \neq 0$  создает градиент давления в направлении от экватора к полюсу. Это, с учетом силы Кориолиса и приводит к движению атмосферы с запада на восток – так называемой зональной циркуляции [7, 8].

Для характеристики интенсивности зональной циркуляции используются различные индексы. Наибольший интерес из них с точки зрения физического смысла представляет индекс Блиновой  $\alpha$  [7, 8] определяемый по картам пространственного распределения атмосферного давления. При этом градиент атмосферного давления и угол наклона изобарических поверхностей от экватора к полюсу, обусловленный  $dt/d\phi \neq 0$  определяет  $\alpha = f(dt/d\phi)$ , как угловую скорость вращения атмосферы относительно Земли. В данной работе в качестве характеристики общей циркуляции атмосферы используется ежедневный безразмерный индекс  $10^3 \alpha / \omega$  [8], где  $\alpha$  – индекс Блиновой,  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли.

В качестве гелиогеофизических индексов использовались:

- индекс геомагнитной активности  $A_p$  [9];
- параметры солнечного ветра: концентрация –  $n_{\max}$ , и скорость –  $V$  по данным [10, 11].
- секторная структура межпланетного магнитного поля, и знак  $B_y$  – составляющей ММП [10, 11].

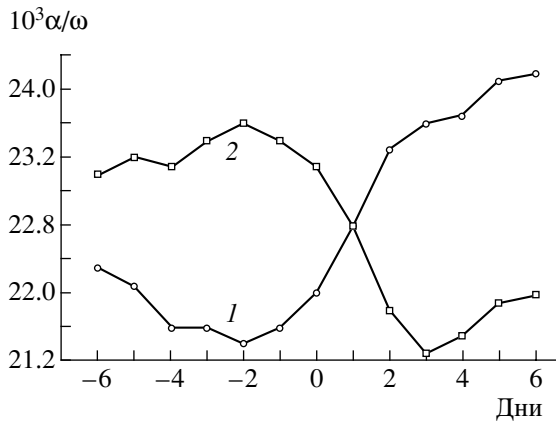
С целью оценки реакции атмосферы на воздействия солнечной активности использовались ежедневные карты пространственного распределения атмосферного давления  $P$  и его суточных приращений  $\Delta P$ .

При анализе параметров солнечного ветра особое внимание уделялось параметру  $n_{\max}$ , наиболее геоэффективному при исследовании связей землетрясений с солнечной активностью. Как было показано, эта связь реализуется через возмущения циркуляции атмосферы [2].

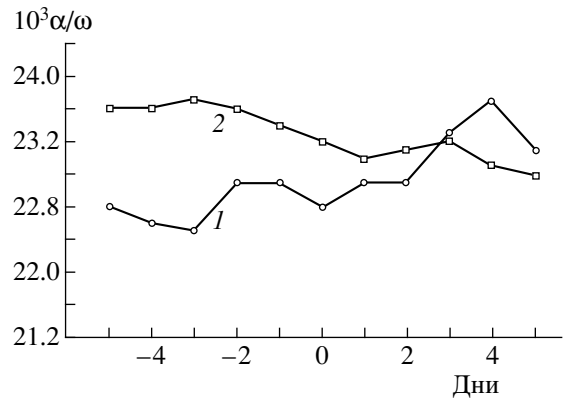
Учитывая выше изложенное, прежде всего, рассматривалась эффективность магнитных бурь в солнечно-атмосферных связях. На рис. 1 приведено распределение среднего (расчитанного методом наложения эпох) индекса Блиновой относительно дней (нулевой день) сильных геомагнитных возмущений  $A_p \geq 40$ . Из данных приведенных на рисунке следует, что изменения индекса Блиновой в промежутке  $-1 \dots +5$  дней составляет около 0.4 и находится в пределах средней квадратической ошибки  $\alpha = \pm 0.5-0.7$ , т.е. геомагнитные бури заметного влияния на циркуляцию атмосферы не оказывает.

Далее рассматривается вопрос о связи планетарной циркуляции атмосферы Земли с параметрами солнечного ветра по данным Кинга [10, 11]. Поскольку землетрясения лучше всего коррелируют с максимальной концентрацией частиц в солнечном ветре  $n_{\max}$  для поставленной цели были отобраны дни с максимальными среднесуточными значениями  $n_{\max}$ .

$n_{\max}$  отбирались по временным графикам  $n_{\max}(t)$  [10, 11] и отличались от предыдущего минимума не менее чем на 5 единиц. Учтен также вывод, что знак реакции циркуляции атмосферы зависит от полярности секторов ММП  $n_{\max}$  и одинаков как при появлении  $n_{\max}$  на границе сектора, так и внутри его [2, 3]. Следовательно, атмосфера реагирует на приход возмущенного солнечного ветра, а не на прохождение секторной границы ММП. Полярность секторов ММП при этом влияет на знак реакции циркуляции атмосферы [3]. Относительно выбранных таким образом дат (0–день) из [10, 11] усреднялись (методом наложенных эпох) ежедневные значения индекса зональной циркуляции атмосферы (индекс Блиновой) [8] для изобарической поверхности 700 гПа Северного полушария. Полученные графики приведены на рис. 2. Данные этих рисунков указывают на существование реакции планетарной циркуляции атмосферы на увеличение концентрации частиц в солнечном ветре, причем как указывалось знак этой реакции зависит от полярности секторов ММП – от знака  $B_y$  составляющей. Распределение (рис. 2) имеют устойчивый характер (этот же эффект наблюдается и для последующих годов). Среднеквадратическая ошибка (даже без учета



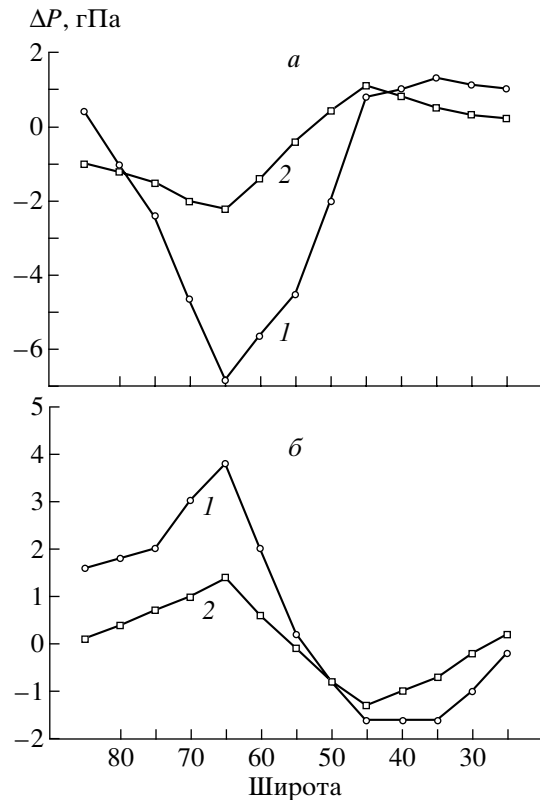
**Рис. 2.** Распределение среднего значения индекса зональной циркуляции атмосферы (700 гПа); 1 – для положительного сектора ММП (131 случай), 2 – отрицательного сектора ММП (187 случаев) за 1963–1975 гг. относительно дней с максимальными значениями  $n$ .



**Рис. 3.** Распределение средних значений индекса зональной циркуляции атмосферы относительно дней с максимальными значениями  $V$ ; 1 – для положительного сектора ММП (117 случаев), 2 – отрицательного сектора ММП (124 случая).

сезонного хода) индекса Блиновой для кривых рис. 2 составляет  $\sigma = \pm 0.5-0.7$ , т.е. средняя вариация использованного индекса в зависимости от параметра  $n_{\max}$  между  $-1...+3$  днями составляет более  $3\sigma$ . Только в 15–20% случае ход кривых отдельных реализаций отличается от средних распределений представленных на рис. 2. Таким образом в уравнениях движения циркуляции атмосферы появляется член зависящий от солнечной активности, т.е.  $\alpha = \alpha_0(\partial t/\partial \phi) + \delta\alpha$ . Последний член соотношения – влияния солнечной активности.

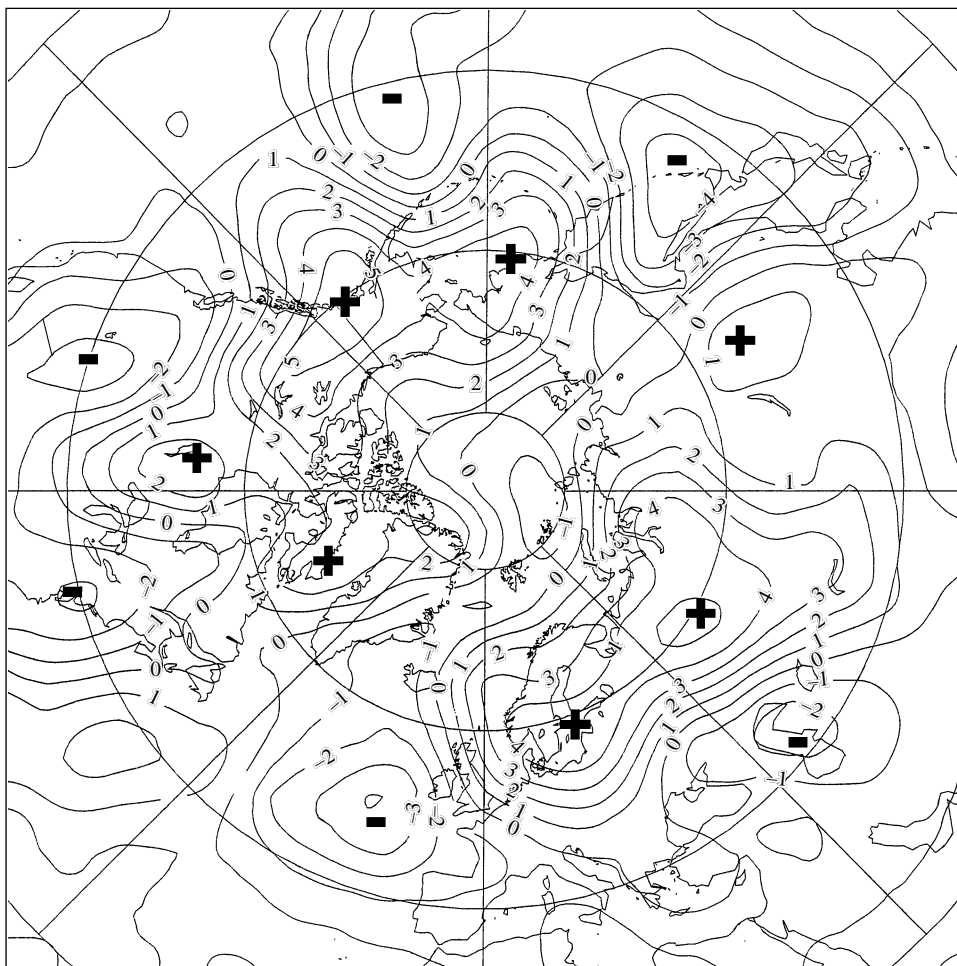
При изучении геомагнитных возмущений основная роль отводится высокоскоростным потокам солнечной плазмы, и, в частности, параметру  $V$  – скорости плазмы солнечного ветра. При этом одним из условий геоэффективности скоростных потоков солнечной плазмы является наличие составляющей ММП  $B_z < 0$ . Были построены также распределения индекса Блиновой (700 гПа) относительно дат максимальных среднесуточных значений параметра  $V$  по данным Клинга [15], с учетом знака составляющей ММП  $B_y$ . Полученные кривые приведены на рис. 3. Сравнение рис. 1 с рис. 2 и рис. 3 показывает, что наиболее эффективным параметром солнечного ветра для атмосферы является  $n_{\max}$ . Причем, как отмечалось выше, возмущения атмосферной циркуляции в этом случае зависит от знака составляющей ММП  $B_y$ , а условие  $B_z < 0$  не является обязательным. Это указывает на различие структур геоэффективных потоков солнечной плазмы для магнитосферы [1] и атмосферы [2, 3] Земли, и сам термин “геоэффективность” получает более широкий смысл. Представляется, что решение проблемы солнечно-атмосферных связей требует иного подхода, чем при изучении физики магнитосферы. Во всяком случае, для атмосферы все возмущенные по-



**Рис. 4.** Изменения средних значений  $\Delta P$  (осредненных по долготам) в зависимости от географической широты за трое суток после  $n_{\max}$  (0 день) для положительного (а) и отрицательного (б) секторов ММП (1 – лето, 2 – зима).

токи, независимо от  $B_z$  составляющей, являются геоэффективными.

Данные рис. 2 (с учетом определения индекса Блиновой [7, 8]) указывают на то, что с приходом возмущенного солнечного ветра в зависимости от



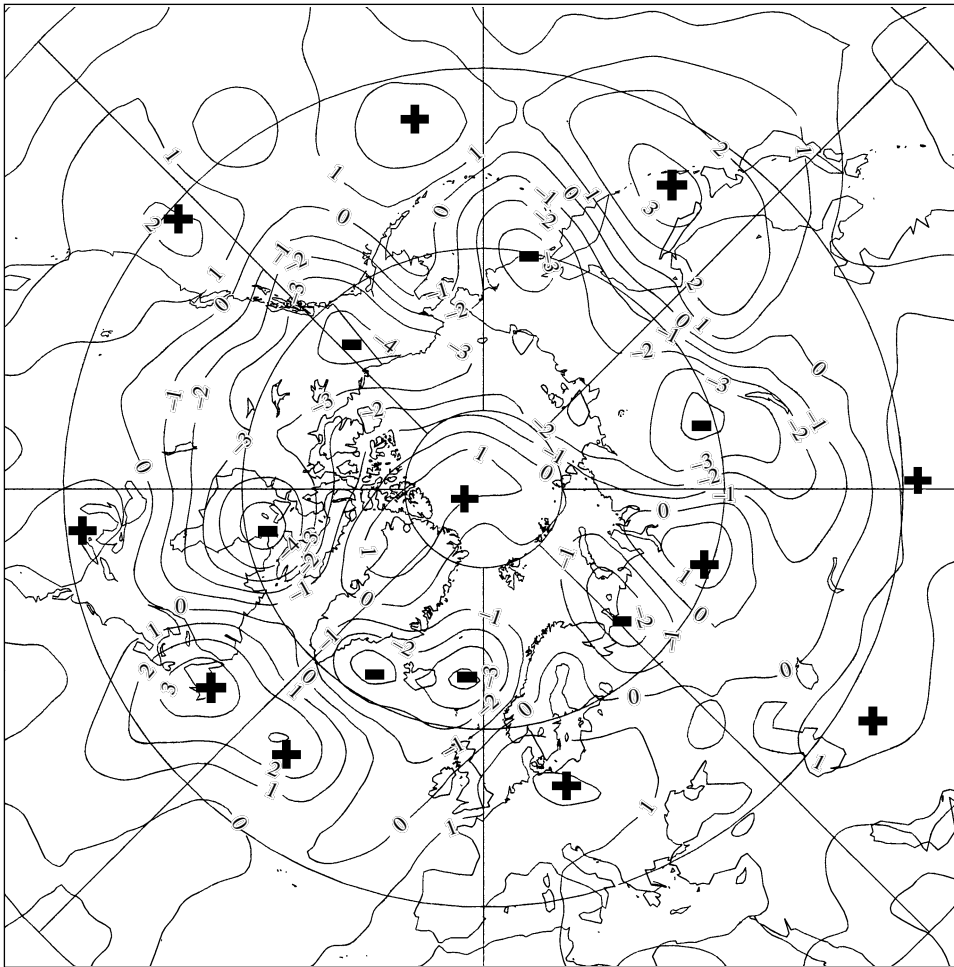
**Рис. 5.** Пространственное распределение реакции приземного атмосферного давления на приход возмущенного солнечного ветра (синоптические карты усредненные по 55 случаям). *а* – для положительного сектора ММП, *б* – для отрицательного сектора ММП.

знака ММП происходит перефокусировка энергии по широтам. Так, при положительном ММП атмосферное давление падает в полярной зоне ( $\varphi > 50^\circ$ ), а при отрицательном ММП наблюдается обратная картина.

Для дальнейшего исследования реакции атмосферы на возмущенный солнечный ветер был проведен анализ приземных синоптических карт. По ежедневным картам были рассчитаны и построены средние карты из аллобар  $\Delta P$  (изменение атмосферного давления  $P$  за трое суток после максимума  $n_{\max}$ , рис. 2) с учетом полярности ММП. На рис. 4 приведен график зависимостей средних  $\Delta P$  от широты  $\Delta\varphi$  для зимы и лета. Причем кривые для положительного и отрицательного секторов идут в противофазе, т.е. в случае появления  $n_{\max}$  в положительном секторе  $\Delta P(\varphi)$  в среднем имеют максимальное падение в зоне  $70\text{--}60^\circ$  и рост в зоне южнее  $50^\circ\text{N}$ , для отрицательного сектора картина меняется на обратную. Зимой реакция атмосферы значительно превышает летнюю.

Это (изменения барического градиента  $dP/d\varphi$ ) и определяет соответствующие вариации планетарной циркуляции в зависимости от знака ММП (рис. 2).

Для проверки устойчивости результатов реакции атмосферы на приход  $n_{\max}$  в зависимости от ММП с учетом параметров солнечного ветра [11], были, также построены средние карты из аллобар  $\Delta P$  за 1977–1984 гг. для положительного (51 случай) и отрицательного (55 случаев) ММП. Полученные карты приведены на рис. 5, 6. Анализ карт показывает, что географическое распределение зон положительных и отрицательных барических тенденций  $\Delta P$  соответствует данным рис. 4. Таким образом, получен устойчивый результат зависимости планетарной циркуляции атмосферы от параметров солнечного ветра. При анализе отдельных, не усредненных карт  $\Delta P$ , зоны отрицательных и положительных барических тенденций несколько мигрируют относительно среднего положения и часто достигают значения  $\Delta P > 30$  гПа.



**Рис. 6.** Пространственное распределение барических тенденций  $\Delta P$  для индивидуального случая прихода возмущенного солнечного ветра  $n_{\max}$ . *a* – для положительного сектора ММП (1973), *б* – для отрицательного сектора ММП (1987).

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные на рис. 2–5 еще раз доказывают существование солнечно-атмосферных связей. Процессы на Солнце и межпланетной среде влияют на планетарную циркуляцию. Эти данные дают основание для рассмотрения вопроса об источниках энергии, реализуемой в импульсных возмущениях планетарной циркуляции атмосферы связанных с СА и с процессами в межпланетной среде. После логарифмирования и последующего дифференцирования формулы определяющей кинетическую энергию вращательного движения, пренебрегая относительным изменением момента инерции атмосферы ( $\Delta J/J \cong 5 \times 10^{-5}$ ), получим  $\Delta K/K = \Delta\alpha/\alpha$  (где  $K$  – кинетическая энергия планетарной циркуляции), т.е.  $\Delta\alpha/\alpha$  на рис. 2 отражает величину кинетической энергии вариации циркуляции атмосферы в связи с процессами на Солнце и в межпланетной среде. В нашем случае  $\Delta\alpha/\alpha \cong 0.12-0.13$  следовательно энергия вариации составляет 12–13% от общей циркуляции атмосферы –  $\Delta K \cong 10^{26}$  эрг, что соответствует энергии цик-

лонов или энергии атмосферных процессов, оказывающих влияние на погоду. Это соответствует также энергии солнечного ветра, падающей на сечение магнитосферы за время возмущения [12]. Кроме того, средняя величина обнаруженной вариации индекса Блинной составляет около 200 от его среднегодовой вариации. С учетом данных [13] можно сделать вывод, что и в этом случае энергия возмущения имеет порядок  $\approx 10^{26}$  эрг.

Учитывая результаты работ [3] и графики рис. 2 можно считать, что повторяемость возмущений циркуляции атмосферы в связи с процессами в межпланетной среде составляет 6–7 дней (средняя повторяемость возмущенных потоков солнечной плазмы) и совпадает с естественным синоптическим периодом. Высказано предположение [3], что в случае импульсного влияния явлений в межпланетной среде на циркуляцию атмосферы энергия сверху вниз передается, по-видимому, непосредственно за счет волнового излучения (эмиссий) возмущенной солнечным ветром верхней атмосферы. Распределение этого излучения

зависимости от секторной структуры ММП. Рассмотренные на рис. 2, 4–6 данные, а также результаты работ [2, 3] свидетельствуют о существовании мощных агентов, вносящих необходимую энергию из околоземного пространства в атмосферу во время возмущений межпланетной среды.

Очень важным для физической интерпретации зависимости циркуляции атмосферы от состояния межпланетной среды представляются графики на рис. 4. Такие же графики  $\Delta h(\varphi)$  получены и для других стандартных барических поверхностей АТ700, АТ500, АТ300гПа [3]. По этим данным с учетом весового вклада величины  $\Delta P_i$  для каждой широты ( $i$ ) определим среднее значение  $\overline{\Delta P}$  для всей полусферы по соотношению  $\overline{\Delta P} = \frac{\sum \Delta P_i \cos \varphi_i}{\sum \cos \varphi_i}$ . Расчеты показывают, что для всех кривых  $\overline{\Delta P} \approx 0$ , т.е. в случае импульсного влияния процессов на Солнце и в межпланетной среде на атмосферу эти процессы не оказывают влияния на ее общую потенциальную энергию (или дают малый энергетический вклад), а выступают как возмущающий фактор, вызывающий главным образом перераспределение (переофокусировку) энергии атмосферы по широтам. Это приводит к изменению общей циркуляции, что, в свою очередь, приводит к нарушению равновесных движений или состояний в атмосфере, обусловленных температурным градиентом, возникающим за счет неравномерного поступления лучистой энергии на поверхность Земли. В этом и состоит механизм влияния процессов на Солнце и межпланетной среде на циркуляцию атмосферы. Энергия установленных вариаций общей циркуляции в зависимости от состояния межпланетной среды соответствует энергии циклонов и, следовательно, достаточно чтобы вызвать изменения погоды [2, 3].

Следовательно, вопрос о влиянии процессов на Солнце и в межпланетной среде на циркуляцию атмосферы не может решаться на основании простого сравнения интенсивности различных видов солнечного излучения. Согласно рис. 2, 4, а также результатов исследований [2, 3] неучет такого влияния при изучении физики атмосферы может привести к существенным ошибкам при интерпретации наблюдений, в том числе и на точность гидрометеорологических прогнозов. Эти данные указывают на то, что атмосферная циркуляция в значительной мере контролируется процессами на Солнце и в межпланетной среде. Более того, как показывают рис. 2, 4, именно эти процессы могут определить существование и продолжительность естественного синоптического периода.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведенные данные подтверждают ранее установленное существование солнечно-атмосферных связей. Энергия солнечно-атмосферных возмущений соответствует энергии циклонов и, следовательно, влияет на погоду. Поэтому в физических и прогностических моделях атмосферы, а также при разработке методов прогноза времени, и места возникновения сильных землетрясений необходимо учитывать солнечную активность и состояние межпланетной среды.

2. Совпадение повторяемости прихода возмущенного солнечного ветра (6–7 сут) с естественным синоптическим периодом указывает на то, что смена синоптических процессов с таким периодом носит вынужденный, а не автоколебательный характер. Это ограничивает возможность (с позиций классического детерминизма) использования классических уравнений, описывающих равновесные движения.

3. Тот факт, что атмосфера сильнее всего реагирует на приход возмущенного солнечного ветра – на увеличение концентрации протонов, а знак реакции (переофокусировки энергии по широтам) атмосферы зависит от полярности ММП свидетельствует о том, что в механизме солнечно-атмосферных связей существенную роль играет магнитное поле Земли.

4. Существует различие в структуре геоэффективных потоках солнечной плазмы для магнитосферы и атмосферы Земли, а сам термин “геоэффективность” получает более широкий смысл. Для атмосферы все возмущенные потоки солнечной плазмы, независимо от составляющих ММП, являются эффективными.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пудовкин М.И., Козелов В.П., Лазутин Л.Л. и др. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. Л.: Наука, 1977. 312 с.
2. Сытинский А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 100 с.
3. Сытинский А.Д., Оборин Д.А. О зависимости планетарной циркуляции атмосферы от процессов в межпланетной среде // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 3. С. 577–581.
4. Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. Мак-Кармана, Т. Селенги. М.: Мир, 1982. 382 с.
5. Мустель Э.Р. Механизм корпускулярно-атмосферных связей. Космос и метеорология / Под ред. М.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 5–14.
6. Пудовкин М.И., Распопов ОМ. Физический механизм воздействия солнечной активности и других геофизических факторов на состояние нижней атмосферы, метеопараметры и климат // УФН. 1993. Т. 163. № 7. С. 113–116.

7. Блинова Е.Н. Гидрометеорологическая теория волн давления, температурных волн и центров действия атмосферы // Докл. АН СССР. 1943. Т. 39. № 3. С. 284–258.
8. Таблицы значений индексов зональной циркуляции атмосферы на уровнях различных изобарических поверхностей 1949–1975 гг. / Под ред. Блиновой Е.Н. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 80 с.
9. Каталог индексов солнечной и геомагнитной активности // Обнинск. МЦД. 1976. 203 с.
10. King J.H. Interplanetary Medium Data Book// Appendix. Maryland: Nat. Space Jci. Data Center, 1977. 216 p.
11. Couzens D.F., King J.H. Interplanetary Medim Data Book. Suppl. 3A. Greenbelt: World Data Center, 1977–1985. 314 p.
12. Ковалевский И.В. Энергетические аспекты солнечно-земных связей. М.: Наука, 1976. 50 с.
13. Борисенков Е.П. Сезонное преобразование энергии в атмосфере Северного и Южного полушарий // Труды ААНИИ. 1963. Т. 253. С. 109.