

## РС-ИНДЕКС – НАЗЕМНЫЙ ИНДИКАТОР ПОСТУПАЮЩЕЙ В МАГНИТОСФЕРУ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

д-р физ.-мат. наук О.А. ТРОШИЧЕВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, olegtro@aari.nw.ru

*РС-индекс как характеристика магнитной активности в полярных шапках был введен в практику около 25 лет назад, но получил окончательное оформление лишь в 2006 г., когда была разработана унифицированная процедура расчета РС-индекса в on-line режиме по данным станций Туле в Гренландии (РСN) и Восток в Антарктике (PCS). Унифицированный РС-индекс соответствует, независимо от времени дня, сезона и солнечного цикла, величине геоэффективного межпланетного электрического поля  $E_t$ , воздействующего на магнитосферу. Другим параметром, влияющим на величину РС-индекса, является динамическое давление солнечного ветра. Увеличение РС-индекса предшествует развитию магнитосферных суббурь и магнитных бурь. Геомагнитные возмущения начинаются, когда величина РС-индекса превышает пороговое значение  $\sim 2$  мВ/м и прекращаются, когда РС-индекс падает ниже этого порога. Интенсивность магнитосферной суббури и длительность ее фазы роста определяются скоростью нарастания РС-индекса перед внезапным началом суббури. Мощность магнитных бурь линейно связана со средней величиной РС-индекса в период развития бури. На основании этих результатов делается вывод, что величина РС-индекса определяется интенсивностью накачки энергии солнечного ветра в магнитосферу и, следовательно, является индикатором энергии солнечного ветра, поступающей в магнитосферу.*

*Ключевые слова:* магнитная активность, РС-индекс, магнитосферные суббури, магнитные бури, диагностика состояния магнитосферы.

### ВВЕДЕНИЕ

Термином «солнечный ветер» обозначают потоки плазмы солнечного происхождения, которые непрерывно распространяются в космическое пространство. В результате воздействия солнечного ветра на магнитосферу Земли возникают различные геомагнитные возмущения, наиболее значительными из которых являются мировые магнитные бури и магнитные суббури [3, 4]. Магнитная буря характеризуется формированием во внутренней магнитосфере, на расстоянии  $\sim 3-7$  земных радиусов ( $R_E$ ) от центра Земли, мощного кольцевого тока, что приводит к планетарной депрессии магнитного поля. Величина депрессии, оцениваемая  $Dst$ -индексом, достигает в низких широтах 400 нТ [4]. Магнитная суббуря ( $DP$ ) характеризуется сильными магнитными возмущениями, вплоть до 2000 нТ, в узкой полосе авроральных широт  $\Phi = 60-70^\circ$  и сопровождается интенсивными полярными сияниями (авроральная суббуря) и комплексом явлений и процессов во внешней магнитосфере, которые характеризуют термином «магнитосферная суббуря». Отличительной чертой суббури является формирование в авроральной зоне мощных западных и восточных токов (электроджетов). Интенсивность электроджетов оценивается  $AL$ - и  $AU$ -индексами, алгебраическая сумма которых,  $AE$ -индекс, рассматривается как показатель интенсивности магнитосферной суббури [5].

Многочисленные анализы, выполненные с началом космической эры, показали зависимость магнитных возмущений от скорости солнечного ветра  $V_{SW}$  и

интенсивности южной компоненты  $B_{ZS}$  межпланетного магнитного поля (ММП). К настоящему времени стало очевидным, что воздействие солнечного ветра на магнитосферу Земли осуществляется через посредство межпланетного электрического поля  $E_Y$ , являющегося произведением скорости солнечного ветра на южную компоненту межпланетного магнитного поля  $E_Y = [V_{SW}B_{ZS}]$ , и динамического давления солнечного ветра  $P_{SW} = nV_{SW}^2$ . Помимо магнитных бурь и магнитосферных суббурь выделяется особый класс полярных магнитных возмущений [2, 10, 12, 13], которые генерируются в полярных областях разными системами продольных магнитосферных токов, связанных с воздействием на магнитосферу южной, азимутальной и северной компонент ММП и скоростью солнечного ветра [6, 18, 21, 22].

Для целей диагностики воздействия солнечного ветра на магнитные бури и суббури наиболее интересны полярные магнитные возмущения  $DP2$ -типа, обусловленные южной компонентой ММП. На рис. 1 показано распределение векторов магнитных возмущений ( $\delta F$ ), наблюдаемых в летней (а) и зимней (б) полярных шапках при воздействии южной компоненты ММП  $B_{ZS} = -1$  нТ, и соответствующие системы эквивалентных  $DP2$ -токов, которые описывают это распределение [2, 22]. Можно видеть, что система  $DP2$ -токов состоит из двух токовых вихрей, центры которых соответствуют областям максимальной интенсивности продольных токов, вытекающих в ионосферу в утреннем секторе и вытекающих из ионосферы в вечернем секторе. Эквивалентные токи в этих вихрях, текущие, соответственно, по часовой и против часовой стрелки, направлены на Солнце в околополюсной области. В летней хорошо проводящей ионосфере  $DP2$ -токи соответствуют реальным ионосферным холловским токам, тогда как в зимней неосвещенной полярной шапке  $DP2$ -токи представляют, главным образом, магнитный эффект продольных токов. Поэтому система эквивалентных токов в зимней околополюсной области оказываются повернутой на  $20-60^\circ$  против часовой стрелки относительно токов в летней полярной шапке [22]. Распределение векторов магнитных возмущений  $\delta F$ , показанное на рис. 1, является статистически обоснованным, т.е. оно наблюдается регулярно при воздействии южной ММП компоненты. Именно эта регулярность послужила основой для разработки методики получения  $PC$ -индекса.

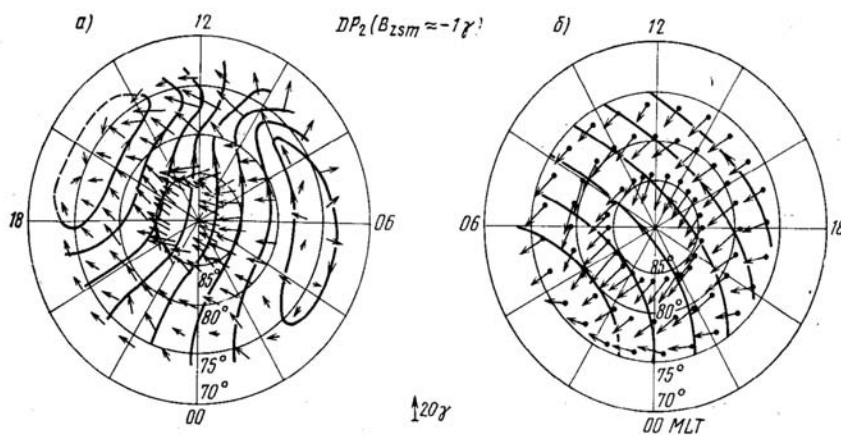


Рис. 1. Распределение векторов магнитных возмущений  $\delta F$  (стрелки), наблюдаемых в летней (а) и зимней (б) полярных шапках при воздействии южной компоненты ММП  $B_{ZS} = -1$  нТ, и соответствующие системы эквивалентных  $DP2$ -токов (сплошные линии), которые описывают это распределение [2, 22]

В работе [21] было предложено рассматривать магнитные *DP2*-возмущения как показатель эффективности воздействия южного ММП на магнитное поле Земли и был введен индекс *MAGPC*, характеризующий величину проекции полярного магнитного возмущения на меридиан 03–15 MLT, соответствующий наиболее вероятной ориентации *DP2*-возмущений (см. рис. 1). В работе [19] был выполнен анализ статистических соотношений между величинами *MAGPC* и различными параметрами солнечного ветра. 15-минутный *MAGPC*-индекс вычислялся по магнитным данным ст. Восток за летние месяцы 1978–1980 гг. Соответствующие величины параметров солнечного ветра были рассчитаны по 5-минутным данным спутника IMF-J. Результаты анализа показали, что индекс *MAGPC* наилучшим образом коррелирует с величиной межпланетного электрического поля  $E_m$ , определенного по формуле [9]:

$$E_m = vB_T \sin^2(\theta/2), \quad (1)$$

где  $B_T$  – тангенциальная компонента межпланетного магнитного поля  $B_T = \sqrt{B_Y^2 + B_Z^2}$ ,  $v$  – скорость солнечного ветра,  $\theta$  – угол между  $B_T$  и осью геомагнитного диполя. На этом основании во всех последующих анализах поле  $E_m$  рассматривалось как геоэффективное межпланетное электрическое поле, действующее на магнитосферу.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА *PC*-ИНДЕКСА

Сила ионосферного электрического тока в полярных шапках определяется проводимостью ионосферы и разностью потенциалов между утренней и вечерней границами полярной шапки, которая регулируется продольными токами. В стандартных условиях (при отсутствии интенсивных вторжений солнечных энергичных протонов) проводимость ионосферы контролируется ультрафиолетовым (УФ) излучением Солнца, суточные и сезонные вариации которого определяют спокойную суточную вариацию магнитного поля в полярной шапке и ее сезонные изменения. Если принять эту вариацию за уровень отсчета *DP2*-магнитных возмущений, то изменения интенсивности *DP2*-токов и соответствующие изменения вектора магнитной возмущенности  $\delta F$  будут показателем эффекта воздействия на магнитосферу межпланетного электрического поля  $E_m$ .

Методика расчета *PC*-индекса была определена в работе [20] и с тех пор не претерпела принципиальных изменений. Она включает следующие процедуры:

1. Определение спокойной суточной вариации для горизонтальных *H*- и *D*-компонент геомагнитного поля как уровня отсчета величины возмущения в компонентах  $\delta H$  и  $\delta D$ .

2. Расчет, для каждого момента *UT*, величины вектора магнитного возмущения  $\delta F$ , определяемого эквивалентными *DP2*-токами. Вектор магнитного возмущения  $\delta F$  на околополюсной станции рассчитывается согласно формуле

$$\delta F = \delta H \sin \gamma \pm \delta D \cos \gamma, \quad (2)$$

где  $\gamma = \lambda \pm D_E + \phi + UT$ ,  $D_E$  – средний угол магнитного склонения на данной станции,  $\lambda$  – географическая долгота,  $\phi$  – угол между направлением трансполярного тока и меридианом полдень–полночь,  $\delta D$  и  $\delta H$  – величины отклонения горизонтальных компонент магнитного поля от спокойного уровня на конкретной станции, знаки (+) и (–) берутся, соответственно, для Южного и Северного полушарий.

3. Расчет корреляции между соответствующими величинами  $\delta F$  и  $E_m$  для каждого момента *UT* и дня года и определение угла  $\phi_{\text{опт}}$ , обеспечивающего максимальную корреляцию между величинами  $\delta F$  и  $E_m$ . Именно этот угол, показывающий статистически обусловленную ориентацию вектора  $\delta F$ , фиксируется для каждого мирового момента *UT* и дня года и используется в качестве заданного параметра в дальнейших расчетах.

4. Определение, при заданном угле  $\phi_{\text{опт}}$ , статистически достоверных коэффициентов регрессии  $\alpha$  (наклон) и  $\beta$  (пересечение с осью координат), определяющих линейную связь между величиной  $\delta F$  и интенсивностью поля  $E_m$  для каждого часа и момента *UT*:

$$\delta F = \alpha E_m + \beta. \quad (3)$$

5. Расчет индекса  $PC$  (как аналога поля  $E_m$ ) в любой конкретный момент  $k$ , по измерениям величины  $\delta F_k$  в этот момент, с использованием известных параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\phi$

$$PC_k = \xi(\delta F_k - \beta)/\alpha, \quad (4)$$

где  $\xi$  – коэффициент пропорциональности. Для удобства сопоставления  $PC$ -индекса с полем  $E_m$  коэффициент  $\xi$  принимается равным 1. В этом случае  $PC$ -индекс имеет размерность  $mV/m$ , и его можно рассматривать как условную меру межпланетного электрического поля  $E_m$ , действующего на магнитосферу, независимо от времени суток, сезона года и особенностей географического положения станции.

$PC$ -индекс для Северного полушария ( $PCN$ ) рассчитывается по данным станции Туле (Гренландия) в Датском метеорологическом институте (ДМИ).  $PC$ -индекс для Южного полушария ( $PCS$ ) рассчитывается по данным станции Восток (Антарктика) в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ). Первоначально рассчитывались 15-минутные  $PCN$ - и  $PCS$ -индексы. Результаты многочисленных статистических анализов, проведенных на основе 15-минутных  $PC$ -индексов, показали, что  $PC$ -индекс можно рассматривать как показатель текущего состояния магнитосферы.

#### УНИФИЦИРОВАННАЯ ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА $PCN$ - И $PCS$ -ИНДЕКСОВ

После перехода к расчету одномоментных  $PC$ -индексов между  $PCN$ - и  $PCS$ -индексами выявились существенные расхождения, которые были устранены после разработки унифицированной процедуры расчета  $PC$ -индекса [16]. В унифицированной процедуре величина магнитного возмущения ( $\delta F$ ) отсчитывается от уровня спокойной суточной вариации («QDC» – *quiet day curve*), которая автоматически определяется для каждой станции в режиме реального времени. Это – основная особенность унифицированной процедуры, которая обеспечивает расчет  $PC$ -индекса в квазиреальном времени. Новый метод автоматического «бегущего» определения спокойной суточной вариации описан в деталях в статье [8].

Разработка унифицированной процедуры велась на основе данных непрерывных спутниковых измерений межпланетного магнитного поля за 1995–2005 гг. и набора соответствующих величин  $\delta F$  за тот же период. Параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\phi$ , необходимые для пересчета величин  $\delta F$  на станциях Туле и Восток в соответствующие  $PCN$ - и  $PCS$ -индексы, определялись при условии выполнения следующих требований:

- $PCN$ - и  $PCS$ -индексы должны соответствовать величине межпланетного электрического поля  $E_m$  с максимально возможной точностью;
- $PCN$ - и  $PCS$ -индексы должны согласовываться друг с другом независимо от того, что они получены по данным разных полушарий;
- не должно быть суточной вариации в поведении  $PCN$ - и  $PCS$ -индексов (т.е. не должно быть зависимости от времени  $UT$ );
- не должно быть годовой вариации в поведении  $PCN$ - и  $PCS$ -индексов (т.е. не должно быть зависимости от сезона).

Рис. 2 (см. цв. вклейку) показывает поведение индексов  $PCN$  (голубая линия) и  $PCS$  (красная линия), рассчитанных с использованием унифицированной процедуры для эпохи максимума солнечной активности (1998–2001 гг.). Положительные  $PCN$ - и  $PCS$ -индексы, характеризующие воздействие поля  $E_m$ , демонстрируют согласованный ход и отсутствие сезонных вариаций. В летней полярной шапке наблюдаются также отрицательные  $PC$ -индексы, которые связаны с воздействием на магнитосферу северной компоненты ММП, но рассчитываются *a priori* по методике разработанной для  $DP2$ -возмущений, генерируемых южной компонентой ММП.

Адекватность  $PCN$ - и  $PCS$ -индексов проверяется путем их сопоставления с соответствующими величинами  $E_m$ . На рис. 3 (см. цв. вклейку) представлен ход

разности между величинами  $E_m$  и  $PCN$  (голубая линия) и разности между величинами  $E_m$  и  $PCS$  (красная линия) для среднесуточных значений  $E_m$ ,  $PCN$  и  $PCS$  в 2000 г. Результаты соответствующего статистического анализа показывают, что соотношение между разностями  $(E_m - PCN)$  и  $(E_m - PCS)$  равно 1, что свидетельствует о тождественности среднесуточных значений  $PCN$ - и  $PCS$ -индексов.

Что касается суточной вариации, то ее не должно быть в случае положительных  $PC$ -индексов, предназначенных для описания хода межпланетного электрического поля  $E_m$ , иначе необходимо допустить, что суточное вращение Земли может влиять на поведение солнечного ветра. Суточная вариация может наблюдаться только в ходе отрицательных  $PC$ -индексов, которые не имеют отношения к  $DP2$ -токовой системе, но рассчитываются по тем же формулам, что и  $DP2$ -возмущения. Наличие или отсутствие суточной вариации в ходе  $PC$ -индекса является наиболее чувствительным индикатором качества процедуры расчета  $PC$ -индекса. В качестве примера на рис. 4 (см. вклейку) показана суперпозиция суточных ходов  $PCS$ -индекса в апреле 1997 г. (слева) и 1998 г. (справа) для унифицированного  $PCS$ -индекса [16] (верхний ряд) и  $PCS$ -индекса, рассчитанного в работе [11] (нижний ряд). Как можно видеть, в ходе положительного унифицированного  $PC$ -индекса отсутствует какая-либо регулярная суточная вариация. Напротив, для  $PCS$ -индекса [11] и в 1997 и в 1998 г. характерны резкие выбросы величины  $PC$  в одни и те же моменты времени (03, 05, 10 и 14 UT), что не может быть объяснено никакими естественными процессами.

#### РЕАКЦИЯ $PC$ -ИНДЕКСА НА ВОЗМУЩЕННЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

Реакция  $PC$ -индекса на резкие изменения параметров солнечного ветра анализировалась в работах [14, 23] на примере межпланетных ударных волн. Межпланетные ударные волны, связанные с выбросом корональных масс ( $CME$ ), характеризуются резким изменением на фронте ударной волны динамического давления солнечного ветра  $P_{SW} = nmV_{SW}^2$  и межпланетного электрического поля  $E_m = V_{SW} \sqrt{B_Z^2 + B_Y^2} \sin^2(\theta/2)$ . Отношение  $PCN$ - и  $PCS$ -индексов к соответствующим изменениям  $E_m$  и  $P_{SW}$  было рассмотрено для 62 событий с ударными волнами в 1998–2002 гг. с импульсом давления  $\Delta P_{SW} > 4$  нПа. Чтобы выделить изменения магнитной активности, вызванные давлением  $P_{SW}$  и полем  $E_m$ , было рассмотрено поведение средних характеристик  $P_{SW}$ ,  $E_m$  и  $PC$  при последовательных выборках (1) разной величины электрического поля  $E_m$ , (2) разной величины  $P_{SW}$  после скачка давления и (3) разной скорости увеличения давления ( $dP_{SW}/dt$ ), при произвольной величине других двух параметров. Поведение  $PC$  сравнивалось с соответствующими изменениями характеристик солнечного ветра  $E_m$  и  $P_{SW}$ , отнесенными к магнитопаузе. Дополнительное время задержки  $\tau_d \sim 20$  мин, необходимое для прохождения сигнала от магнитопаузы до полярной ионосферы, не учитывалось. Использовался метод наложенных эпох, при этом во всех случаях момент максимума производной  $dP/dt$  (т.е. начало импульса давления) принимался за ключевую («нулевую») дату.

Результаты анализа показали, что рост  $PC$ -индекса начинается сразу после внезапного увеличения динамического давления  $P_{SW}$  (с задержкой в несколько минут), при этом  $PC$ -индекс отвечает только на изменение давления  $dP_{SW}/dt$  вне зависимости от величины давления  $P_{SW}$ . Дальнейшее поведение магнитной активности в полярных шапках определяется, с временем задержки  $\sim 15$ – $30$  мин, изменением межпланетного электрического поля  $E_m$ , при этом летний  $PC$ -индекс оказывается больше зимнего  $PC$ -индекса на  $0,5$ – $1,5$  мВ/м.  $PC$ -индекс возвращается к невозмущенному уровню спустя  $1$ – $1,5$  ч после импульса давления солнечного ветра. Из анализа соотношений между величинами  $E_m$ ,  $\Delta P_{SW}$  и  $PC$  была получена оценка воздействия градиента давления на  $PC$ -индекс. Оказалось, что эффект

$\Delta P_{sw} = 1$  нПа примерно адекватен эффекту увеличения электрического поля  $E_m$  на 0,33 мВ/м. Этот результат был подтвержден при рассмотрении конкретных событий взаимодействия магнитосферы с северным ММП и воздействия на магнитосферу отрицательных импульсов давления солнечного ветра. Таким образом, импульсы динамического давления солнечного ветра  $\Delta P_{sw}/\Delta t$  (т.е. резкие изменения величины давления) являются вторым, после межпланетного электрического поля, фактором, определяющим величину и вариации магнитной активности в полярной шапке.

#### PC-ИНДЕКС И МАГНИТОСФЕРНЫЕ СУББУРИ

Статистические соотношения между поведением индекса  $PC$  и ходом магнитных возмущений в авроральной зоне ( $AL/AU$ -индексы) в случае изолированных суббурь рассматривались в анализе [7]. Внезапные магнитные возмущения, происходящие на спокойном фоне, были разделены по их интенсивности и характеру развития на четыре класса: слабые магнитные бухты ( $AL \sim 150$  нТ), короткие суббури с длительностью до 3 часов и  $AL \approx 300$  нТ, продолжительные суббури с длительностью более 3 часов и  $AL \sim 400$  нТ и замедленные суббури с длительностью также более 3 часов и  $AE > 200$  нТ. Разделение на продолжительные и замедленные суббури проводилось по характеру развития возмущения: в случае длительных суббурь резко выраженный максимум возмущения фиксировался в течение

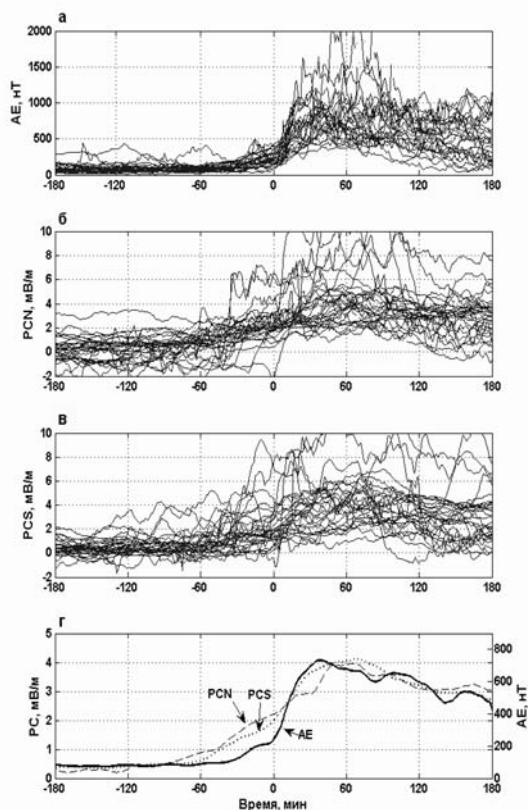


Рис. 5. Зависимость между изменениями  $PC$ - и  $AE$ -индексов в случае длительных изолированных суббурь.

Показана суперпозиция хода индексов (а)  $AE$ , (б)  $PCN$  и (в)  $PCS$  для конкретных суббурь и (г) поведение средних значений индексов [7]

1–1,5 часов после внезапного начала, тогда как в случае замедленных суббурь интенсивность возмущения нарастала медленно и пологий максимум возмущения наблюдался только через несколько часов после внезапного начала. Для анализа соотношений между активностью в полярной шапке ( $PC$ -индекс) и в авроральной зоне ( $AU/AL/AE$ -индексы) использовался метод наложенных эпох при выборе внезапного начала возмущения в авроральной зоне за нулевой момент  $T = 0$ .

В работе [15] анализировались мощные ( $AL > 400$  нТ) периодически повторяющиеся возмущения, называемые обычно «пилообразными» (*saw-tooth*) суббурями. Рассматривались пилообразные возмущения, интенсивность которых менялась волнообразным образом соответственно флуктуациям поля  $E_m$ . Как и в предыдущем анализе, использовался метод наложенных эпох.

В качестве примера на рис. 5 и 6 показан ход индексов магнитной активности в полярной шапке ( $PC$ ) и в авроральной зоне  $AE(AL)$  для изолированных продолжительных суббурь ( $N = 26$ ) и периодически повторяющихся суббурь ( $N = 43$ ) и поведение их средних значений. Можно видеть, что во всех случаях уверенный рост  $PC$ -индекса начинается задолго до внезапного начала возмущения. Этот интервал постепенного роста магнитной активности в полярной шапке, предшествующий внезапному началу возмущения в авроральной зоне, был назван, в соответ-

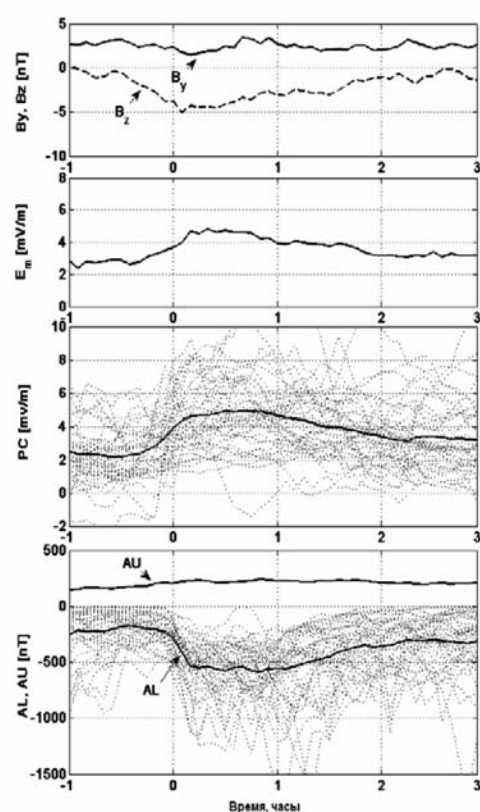


Рис. 6. Суперпозиция хода  $PC$ - и  $AU/A$ -индексов для 43 периодических магнитных возмущений (тонкие линии) и соответствующие усредненные вариации  $B_z$  и  $B_y$  компонент ММП, электрического поля  $E_m$  и индексов  $PC$ ,  $AU/AL$  (толстые линии), полученные методом наложения эпох [15]

ствии с общепринятой терминологией, «фазой роста». Детальный анализ соотношений между поведением  $PC$ -индекса и развитием магнитных возмущений в авральной зоне для различных классов магнитосферных суббурь позволяет выделить общие закономерности в ходе развития суббурь в их отношении к вариациям  $PC$ -индекса.

Рис. 7 суммирует статистические соотношения между  $PC$ - и  $AL/AU$ -индексами [15], при этом вместо  $PCN$ - и  $PCS$ -индексов показан ход  $PC$ -индекса в летней ( $PC_{sum}$ ) или зимней ( $PC_{win}$ ) полярных шапках, безотносительно к месту его измерения (Северное или Южное полушарие). Летний  $PC$ -индекс определялся как усред-

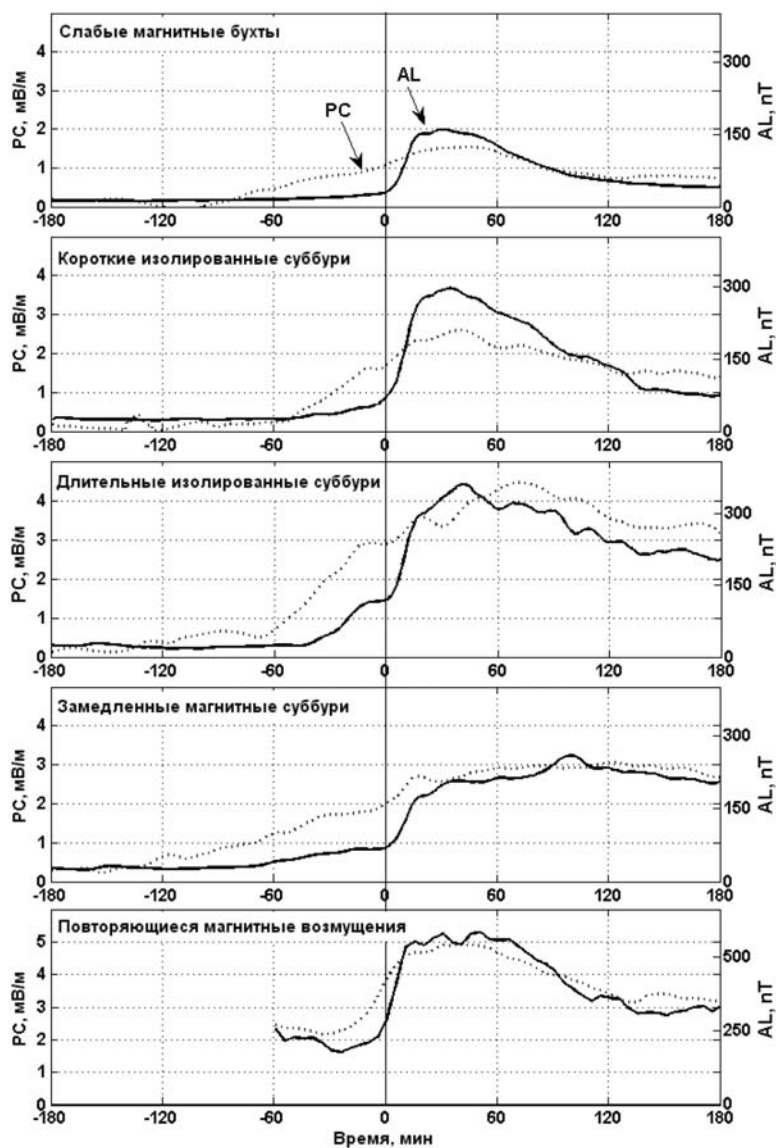


Рис. 7. Ход средних значений  $PC$ - и  $AL$ -индексов для разных классов магнитных возмущений в авральной зоне [15]



ненная величина  $PCN$ -индекса в период с мая по август и  $PCS$ -индекса в период с ноября по февраль; аналогичным образом определялся зимний  $PC$ -индекс. Как можно видеть, поведение усредненного летнего и зимнего  $PC$ -индексов на фазе роста заметно различается. Летний  $PC$ -индекс начинает увеличиваться раньше, чем зимний индекс, а скорость нарастания летнего  $PC$  оказывается почти в два раза выше, чем зимнего  $PC$ . При этом зимний  $PC$ -индекс следует ходу аврорального индекса  $AL$ . На фазе экспансии (после внезапного начала) скорость роста летнего  $PC$  становится меньше, тогда как скорости роста зимнего  $PC$  увеличивается в согласии с поведением  $AL$ -индекса. После достижения максимума суббури происходит выравнивание зимнего и летнего  $PC$ -индексов.

В случае магнитных бухт рост  $PC$ -индекса начинается примерно за 1,5 ч, а рост  $AE$ -индекса за 40 мин до внезапного начала возмущения в авроральной зоне. В случае коротких, продолжительных и замедленных суббурь фаза роста  $PC$ -индекса длится около часа, а фаза роста  $AE$ -индекса – 20–30 мин. В случае периодически повторяющихся суббурь рост  $PC$  (и соответствующего поля  $E_m$ ) начинается примерно за 25 мин, а рост  $AL$ -индекса только за ~10 мин до внезапного начала суббури. Во всех случаях, внезапное начало суббури наблюдалось при величине  $PC$ -индекса не ниже 1,7–2 мВ/м. В случае магнитных бухт и коротких изолированных суббурь  $PC$ -индекс достигал максимума сразу после внезапного начала и затем быстро падал. В случае изолированных продолжительных и замедленных

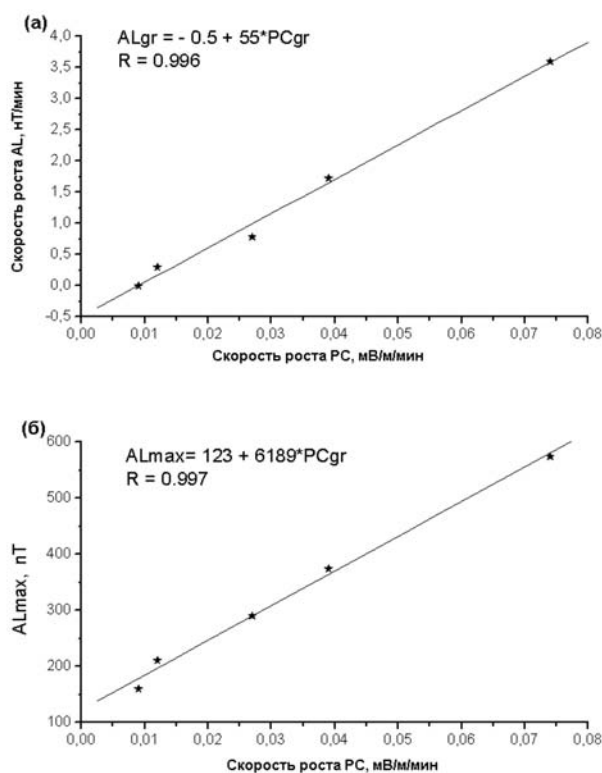


Рис. 8. Зависимость скорости роста  $AL$  от скорости роста  $PC$  на предварительной фазе суббури (а) и зависимость интенсивности магнитного возмущения на фазе экспансии ( $AL_{max}$ ) от скорости роста  $PC$  (б) [17]

суббурь и периодически повторяющихся суббурь рост  $PC$ -индекса продолжался и после внезапного начала. Таким образом, общий характер соотношений между  $PC$ - и  $AL$ -индексами оказывается одним и тем же для всех классов суббурь: рост магнитной активности в полярной шапке предшествует внезапному началу магнитного возмущения в авроральной зоне, характер развития суббури находится в тесной связи с поведением  $PC$ -индекса после внезапного начала.

На основании рис. 7 можно определить средние параметры, характеризующие развитие разных типов суббурь: длительность фазы роста (временной интервал между началом роста  $PC$  и внезапным началом возмущения в  $AL$ ), средние величины  $PC$  и  $AL$ , наблюдаемые в ключевые моменты суббури (начало фазы роста, внезапное начало суббури, максимум суббури), а также среднюю скорость роста  $PC$  и  $AL$  перед и после внезапного начала ( $PC_{GR} = dPC/Tgro$  и  $AL_{GR} = dAL/Tgro$ ). Анализ соотношений между этими параметрами показывает, что ключевой характеристикой, определяющей развитие и тип суббури, является скорость роста  $PC$ -индекса ( $PC_{GR}$ ) в период, предшествующий внезапному началу. В частности, величина  $PC_{GR}$  определяет такие важные показатели суббури, как скорость увеличения  $AL$  на фазе роста  $AL_{GR} = -0,5 + 55PC_{GR}$  ( $R = 0,996$ ) и интенсивность магнитной суббури  $AL_{max} = 114 + 6570PC_{GR}$  ( $R = 0,997$ ) (рис. 8). Согласно последнему соотношению, при скорости роста  $PC$ -индекса  $\sim 0,2$  мВ/м/мин (что эквивалентно скачку  $PC$ -индекса на 2 мВ/м за 10 мин) интенсивность суббури будет  $\sim 1600$  нТ. Таким образом, результаты [7, 15] свидетельствуют о том, что интенсивность магнитосферной суббури находится в тесной связи со скоростью роста магнитной активности в полярной шапке и внезапное начало суббури происходит тогда, когда  $PC$ -индекс достигает порогового значения  $\sim 1,7-2$  мВ/м.

#### **$PC$ -ИНДЕКС И ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ**

Анализ соотношений между поведением  $PC$ -индекса и развитием геомагнитных бурь проводился на основании 1-минутных данных о  $PCN/PCS$ -индексах, рассчитанных в ААНИИ, и данных о  $Dst$ -индексе, рассчитываемых в МЦД-С2 (Киото) за период 1998–2004 гг. [17]. Поскольку  $PC$  в летней полярной шапке обычно сильнее реагирует на изменения  $E_m$  [7, 23], в анализе использовался летний  $PC$ -индекс вне зависимости от того, в каком полушарии он был получен. Электрическое поле  $E_m$  вычислялось по измерениям параметров солнечного ветра на борту спутника АСЕ, приведенным к границе магнитосферы с учетом времени прохождения солнечного ветра от спутника до Земли. Для анализа отбирались бури длительностью не менее 12 ч с явно выраженной депрессией. За период 1998–2004 гг. было отобрано 54 бури с магнитудой в интервале от  $Dst = -30$  нТ до  $Dst = -370$  нТ. Использовался метод наложенных эпох, при этом в качестве начальной даты ( $T = 0$ ) выбирался момент уверенного превышения величины  $E_m$  над пороговым уровнем 2 мВ/м. Выделялись следующие фазы в развитии бури: фаза роста как временной интервал от момента  $T = 0$  до момента минимума величины  $Dst$ , главная фаза как интервал между минимумом  $Dst$  и моментом обратного перехода  $E_m$  (или  $PC$ ) через пороговое значение и фаза восстановления как интервал после устойчивого падения  $PC$ -индекса ниже порогового значения 2 мВ/м.

Рассмотрение конкретных событий показало, что развитие магнитной бури (т.е. ход  $Dst$ -индекса) определяется поведением электрического поля  $E_m$  (и связанного с ним  $PC$ -индекса). Во всех без исключения случаях депрессия геомагнитного поля начиналась после устойчивого превышения  $E_m$  (и  $PC$ ) порогового значения  $\sim 2$  мВ/м. Дальнейший ход  $Dst$  зависит от характера изменений  $E_m$ . Если  $E_m$  растет быстро и остается затем на достаточно высоком уровне, то имеет место классический образец бури с быстрым развитием депрессии и ее медленным затуханием. Если поле  $E_m$  растет медленно и достигает наибольшей величины только к концу рассматриваемого

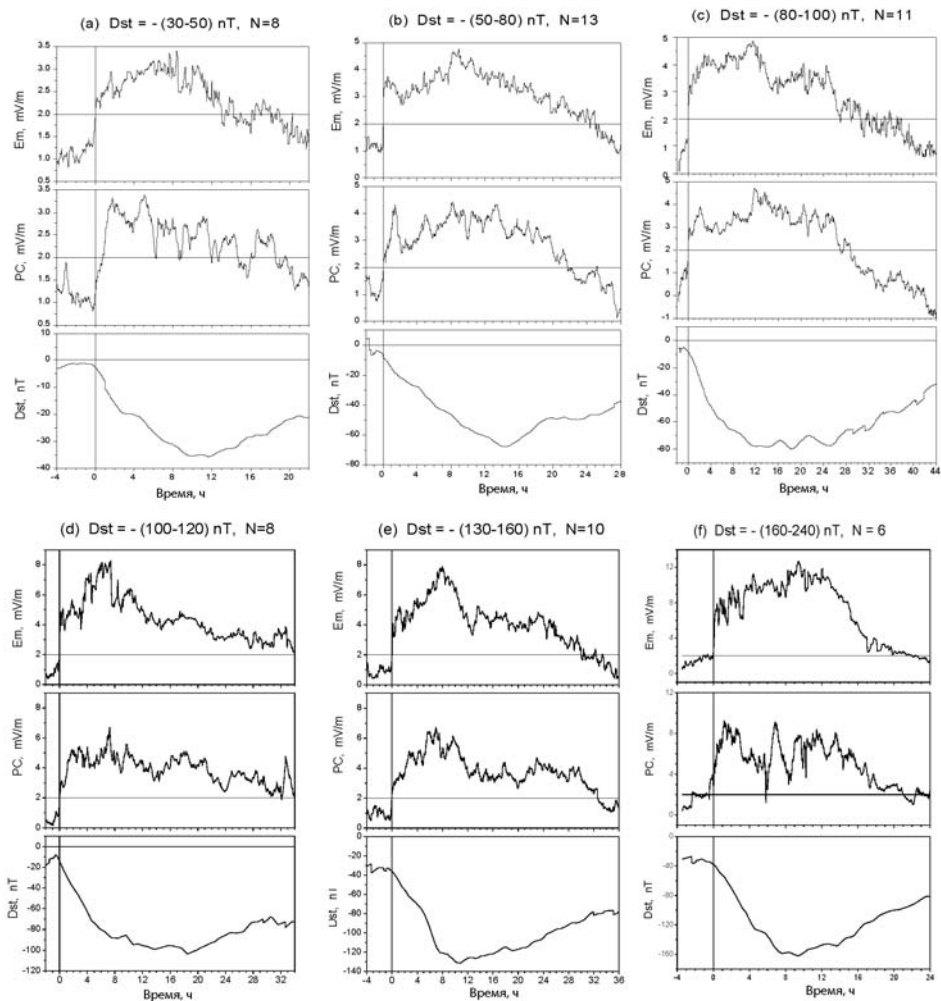


Рис. 9. Поведение усредненных величин геоэффективного межпланетного электрического поля  $E_m$  (верхний ряд),  $PC$ -индекса (средний ряд) и  $Dst$ -вариации (нижний ряд) для 6 категорий величины магнитной бури: : (a)  $-30 > Dst > -50$  нТ, (b)  $-50 > Dst > -80$  нТ, (c)  $Dst > -270$  нТ.

За время  $T = 0$  берется момент перехода величины  $E_m$  через пороговое значение 2 мВ/м [17]

периода, наблюдается буря с медленным развитием депрессии и ее быстрым затуханием. Если усиления и ослабления величины поля  $E_m$  длительностью более 2 ч сменяют друг друга, соответствующие уменьшения и увеличения наблюдаются в ходе  $Dst$ .

Количественные соотношения между ходом  $E_m$  и  $Dst$  значительно усложняются флуктуациями  $E_m$  с длительностью менее 1 ч, влияние которых на ход  $Dst$  остается неочевидным. Чтобы сгладить возможное влияние этих кратковременных флуктуаций, геомагнитные бури были разделены на 6 градаций, согласно их интенсивности (минимальной величине  $Dst$ -индекса):  $-30 > Dst > -50$  нТ,  $-50 > Dst > -80$  нТ,  $-80 > Dst > -100$  нТ,  $-100 > Dst > -120$  нТ,  $-120 > Dst > -160$  нТ и  $-160 > Dst > -270$  нТ. Ход усредненных величин  $E_m$ ,  $PC$  и  $Dst$  для этих градаций показан на рис. 9. Можно видеть, что депрессия магнитно-

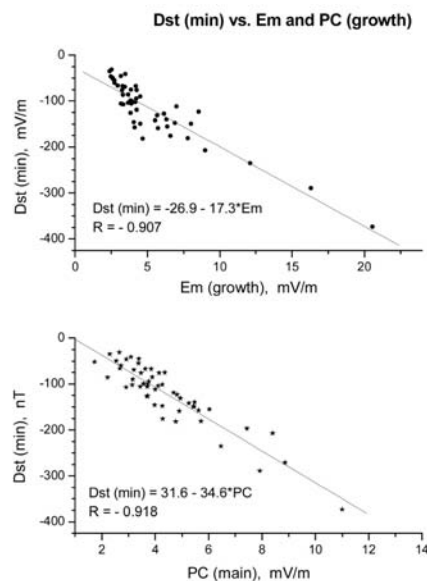


Рис. 10. Зависимость интенсивности геомагнитной бури (минимум  $Dst$ ) от значений  $E_m$ (growth) и  $PC$ (growth), полученных при усреднении величин  $E_m$  и  $PC$  за временной интервал от начала бури до максимума бури (минимум  $Dst$ ) [17]

го поля (падение  $Dst$ -индекса) начинается, когда величина поля  $E_m$  (и  $PC$ -индекса) превышает пороговый уровень  $\sim 2$  мВ/м, и усиливается до тех пор, пока наблюдается рост средних значений  $E_m$  и  $PC$ . При этом максимальная депрессия достигается через  $\sim 1-2$  ч после соответствующего максимума в  $E_m$  (и  $PC$ ). Главная фаза бури продолжается пока величины  $E_m$  и  $PC$  превышают пороговое значение, а финальное падение  $E_m$  и  $PC$  ниже  $\sim 2$  мВ/м знаменует начало фазы восстановления.

Чтобы убедиться в неслучайном характере этих совпадений, мы рассчитали две серии средних значений поля  $E_m$  и индекса  $PC$ . Первая серия содержала величины  $E_m$ (growth) и  $PC$ (growth), усредненные за время длительности фазы роста, т.е. за временной интервал от начала бури ( $T = 0$ ) до времени максимума бури ( $Dst_{min}$ ). Вторая серия содержала величины  $E_m$ (main) и  $PC$ (main) усредненные за время длительности главной фазы (т.е. временной интервал от момента максимума бури  $Dst_{min}$  до момента уверенного падения величин  $E_m$  (или  $PC$ ) ниже порогового уровня  $\sim 2$  мВ/м). Значения  $E_m$ (growth) и  $PC$ (growth) для каждой из 54 геомагнитных бурь затем сопоставлялись с соответствующими величинами интенсивности бури  $Dst$ (min), а значения  $E_m$ (main) и  $PC$ (main) были сопоставлены с величинами  $Dst$ (recov), которые фиксировались в момент финального пересечения порогового уровня  $\sim 2$  мВ/м. Осреднение проводилось по 1-минутным данным о  $E_m$ .

Рис. 10 показывает соотношение между усредненными величинами  $E_m$ (growth) и  $PC$ (growth) и интенсивностью магнитной бури ( $Dst_{min}$ ). Можно видеть, что интенсивность мировой бури явно контролируется величиной межпланетного электрического поля  $E_m$ , воздействующего на магнитосферу, и, соответственно, жестко связана с величиной  $PC$ -индекса. Четкая зависимость максимальной депрессии магнитного поля от величин  $E_m$  и  $PC$ , усредненных за интервал длительности фазы роста бури, имеет место независимо от типа геомагнитной бури и ее длительности.

Как отмечалось ранее, момент финального падения величин  $E_m$  и  $PC$  ниже пороговой величины 2 мВ/м примерно соответствует переходу от главной фазы бури к фазе восстановления. Этот момент был оценен независимо по двум сериям дан-

ных  $E_m(\text{main})$  и  $PC(\text{main})$ , и для каждой из серий были определены соответствующие величины  $Dst(\text{recov})$ . Оказалось, что между величинами  $Dst(\text{recov})$ , полученными по двум сериям данных, имеет место хорошая корреляция ( $R = 0,95$ ), при этом  $PC(\text{main})$  обеспечивает несколько меньшую величину  $Dst(\text{recov})$ . Связь между величинами  $Dst(\text{recov})$  и соответствующими значениями  $E_m(\text{main})$  оказалась значительно хуже ( $R < 0,5$ ), хотя корреляция между  $Dst(\text{recov})$  и  $PC(\text{main})$  сохранялась достаточно высокой ( $R < 0,71$ ). Этот результат объясняется сильной зависимостью величины  $Dst(\text{recov})$  от глубины депрессии геомагнитного поля во время главной фазы  $Dst_{\min}$  ( $K = 0,825$ ).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

$PC$ -индекс был введен [19, 20] как показатель магнитной активности, создаваемой в полярных шапках геоэффективным межпланетным электрическим полем  $E_m$ . Кроме того,  $PC$ -индекс адекватно реагирует на импульсы динамического давления солнечного ветра. Отсюда следует, что  $PC$ -индекс может рассматриваться как показатель геоэффективности солнечного ветра, взаимодействующего с магнитосферой. С другой стороны,  $PC$ -индекс связан статистически обобщенными соотношениями с индексами  $AL(AE)$  и  $Dst$ , которые характеризуют расход энергии, накапливаемой в магнитосфере в процессе этого взаимодействия.

При этом динамика и интенсивность магнитных бурь и суббурь лучше коррелируют с ходом  $PC$ -индекса, чем с изменениями величины  $E_m$ , что объясняется следующими обстоятельствами: (1) определение величины  $E_m$  основано на измерениях параметров солнечного ветра далеко за пределами магнитосферы, тогда как реальные параметры солнечного ветра на границе магнитосферы могут существенно отличаться от измеренных на спутнике; (2) плазма в переходной области между ударной волной и магнитопаузой высоко турбулизована [1], и, следовательно, реальное поле  $E_m$ , действующее на магнитопаузе, не тождественно полю  $E_m$ , принесенному солнечным ветром к границе магнитосферы, что означает, что сигнал о вариациях параметров солнечного ветра подвергается значительным искажениям на пути от границы магнитосферы до полярной шапки; (3) помимо электрического поля  $E_m$ , на  $PC$ -индекс оказывают влияние импульсы динамического давления солнечного ветра.

Поведение  $PC$ -индекса предопределяет динамику и интенсивность магнитных возмущений: рост  $PC$ -индекса предшествует началу магнитосферных суббурь и развитию магнитных бурь; суббури и магнитные бури начинаются, когда  $PC$ -индекс превышает пороговое значение  $\sim 2$  мВ/м, и затухают, когда  $PC$ -индекс падает ниже этого значения; интенсивность магнитосферных суббурь определяется скоростью увеличения  $PC$ -индекса на фазе роста суббури; мощность магнитных бурь линейно связана со средней величиной  $PC$ -индекса на фазе развития бури.

Указанные экспериментальные закономерности позволяют сделать вывод, что величина  $PC$ -индекса характеризует интенсивность накачки энергии солнечного ветра в магнитосферу и, следовательно,  $PC$ -индекс является индикатором энергии солнечного ветра, поступающей в магнитосферу. В этом качестве  $PC$ -индекс может быть эффективно использован для мониторинга тенденций развития магнитосферных суббурь и магнитных бурь.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Россоленко С.С., Антонова Е.Е., Ермолаев Ю.И., Веригин М.И., Киричев И.П., Бородкова Н.Л. Турбулентные флуктуации параметров плазмы и магнитного поля в переходной области и формирование низкоширотного пограничного слоя: наблюдения на спутниках 2 марта 1996 г. // Космич. исслед. 2008. № 46. С. 373–382.
2. Трошичев О.А., Цыганенко Н.А. Корреляционные соотношения между вариациями межпланетного магнитного поля и магнитными возмущениями в полярной шапке // Геомагн. исслед. 1979. № 25. С. 47–59.

3. *Akasofu S.-I. and Chapman S.* Solar-Terrestrial Physics. Oxford, 1972. Vol. 1. 384 p., Vol. 2. 512 p.
4. *Chapman S.* Solar plasma, geomagnetism and aurora, in *Geophysics: The Earth's Environment* / Eds. C.DeWitt, et al. New York–London. Gordon and Breach Sci. Pub., 1963. P. 243–379.
5. *Davis T.N., Sugiura M.* Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // *J. Geophys. Res.* 1966. Vol. 71. P. 785–801.
6. *Gizler V.A., Semenov V.S., Troshichev O.A.* Electric fields and currents in the ionosphere generated by field-aligned currents observed by TRIAD // *Planet. Space Sci.* 1979. Vol. 27. P. 223–231.
7. *Janzhura A., Troshichev O., Stauning P.* Unified PC indices: Relation to the isolated magnetic substorms // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. A09207. doi: 10.1029/2006JA012132.
8. *Janzhura A.S., Troshichev O.A.* Determination of the running quiet daily geomagnetic variation // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70. P. 962–972.
9. *Kan, J.R., Lee L.C.* Energy coupling function and solar wind-magnetosphere dynamo // *Geophys. Res. Lett.* 1979. Vol. 6. P. 577.
10. *Kuznetsov B.M., Troshichev O.A.* On the nature of polar cap magnetic activity during undisturbed periods // *Planet. Space Sci.* 1977. Vol. 25. P. 15–21.
11. *Lukianova R.* Magnetospheric response to sudden changes in solar wind dynamic pressure inferred from polar cap index // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. A12, doi: 10.1029/2002JA009790.
12. *Nishida A.* Coherence of geomagnetic DP2 fluctuations with interplanetary magnetic variations // *J. Geophys. Res.* 1968. Vol. 73. P. 5549.
13. *Obayashi T.* The interaction of solar plasma with geomagnetic field, disturbed conditions, In *Solar terrestrial physics* / Ed. J.W.King, W.S.Newman. N.Y., 1967. P. 107.
14. *Stauning P., Troshichev O.* Polar cap convection and PC index during sudden changes in solar wind dynamic pressure // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. A08227, doi:10.1029/2007JA012783.
15. *Troshichev O., Janzhura A.* Relationship between the PC and AL indices during repetitive bay-like magnetic disturbances in the auroral zone // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009. Vol. 71. P. 1340–1352.
16. *Troshichev O., Janzhura A., Stauning P.* Unified PCN and PCS indices: Method of calculation, physical sense and dependence on the IMF azimuthal and northward components // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. A05208, doi:10.1029/2005JA011402.
17. *Troshichev O., Sormakov D., Janzhura A.* The Dst variation of geomagnetic storms and PC index // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. (in press).
18. *Troshichev O.A.* Polar magnetic disturbances and field-aligned currents // *Space Sci. Rev.* 1982. Vol. 32. P. 275–360.
19. *Troshichev O.A., Andrezhen V.G.* The relationship between interplanetary quantities and magnetic activity in the southern polar cap // *Planet. Space Sci.* 1985. Vol. 33. P. 415.
20. *Troshichev O.A., Andrezhen V.G., Vennerstrom S., Friis-Christensen E.* Magnetic activity in the polar cap – A new index // *Planet. Space Sci.* 1988. Vol. 36. P. 1095.
21. *Troshichev O.A., Dmitrieva N.P., Kuznetsov B.M.* Polar cap magnetic activity as a signature of substorm development // *Planet. Space Sci.* 1979. Vol. 27. P. 217.
22. *Troshichev O.A., Gizler V.A., Ivanova I.A., Merkurieva A.Yu.* Role of field-aligned currents in generation of high latitude magnetic disturbances // *Planet. Space Sci.* 1979. Vol. 27. P. 1451–1459.
23. *Troshichev O.A., Janzhura A.S., Stauning P.* Magnetic activity in the polar caps: Relation to sudden changes in the solar wind dynamic pressure // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. A11202, doi:10.1029/2007JA012369.

*O.A.TROSHICHEV*

### PC-INDEX AS AN INDICATOR OF THE SOLAR WIND ENERGY INCOMING INTO THE MAGNETOSPHERE

*The paper gives a short review of the experimental results, which formed the physical backgrounds for concept of the ground-based index characterizing the solar wind energy input into the magnetosphere. It is*

*shown that the PC index properly responds to influence of the solar wind parameters, such as the geoeffective interplanetary electric field and dynamic pressure pulses, irrespective of UT times, season and location of stations in the northern (PCN) or southern (PCS) hemispheres. Case studies and statistical analyses of relationships between the PC index and magnetospheric substorm and geomagnetic storm clearly demonstrate that the PC growth always preceded to magnetic disturbances, that substorm onset and storm beginning occur when PC value exceeds the define threshold level  $\sim 2$  mV/m, that the intensity and run of substorms is determined by the PC growth rate, that the storm magnitude ( $Dst$  min) is proportional to average PC value during growth phase, and so on. These experimental facts testify that the PC index manifests itself as a reliable ground-based indicator of the solar wind energy incoming into the magnetosphere.*

*Keywords:* polar cap magnetic activity, magnetospheric substorms, magnetic storms, solar wind energy, magnetosphere state diagnostic.