

МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ И СОСТОЯНИЯ МАГНИТОСФЕРЫ ПО НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ О МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ В ПОЛЯРНЫХ ШАПКАХ (PC ИНДЕКС)

д-р физ.-мат. наук О.А. ТРОШИЧЕВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: olegtro@ari.ru

Первоначально PC индекс был введен как индикатор магнитной активности, которая генерируется в полярных шапках под воздействием межпланетного электрического поля E_{KL} . Одноминутный PC индекс рассчитывается независимо по данным околополюсных станций Туле в Гренландии (PCN) и Восток в Антарктике (PCS) с использованием единой методики. В 2013 г. PC индекс был одобрен Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавтики (МАГА) как новый международный индекс магнитной активности, характеризующий поступающую в магнитосферу энергию солнечного ветра. Об этой отличительной особенности PC индекса свидетельствуют следующие экспериментальные результаты: 1) рост PC индекса всегда предшествует развитию магнитных бурь и суббурь; 2) поведение PC индекса перед началом суббури определяется вариациями поля E_{KL} ; 3) внезапное начало суббури, как правило, связано с резким увеличением скорости роста PC (и E_{KL}); 4) временная задержка ΔT в отклике PC на изменение параметров солнечного ветра определяется скоростью роста поля E_{KL} (dE_{KL}/dt); 5) частота появления суббурь достигает максимума, когда величина PC превышает пороговое значение $\sim (1,5 \pm 0,5)$ мВ/м; 6) для всех типов суббурь характерна линейная связь между величинами PC и AL; 7) главная фаза магнитных бурь (депрессия магнитного поля) начинает развиваться, когда PC устойчиво превышает пороговое значение $\sim 1,5$ мВ/м; 8) развитие магнитной бури следует с задержкой ~ 1 ч за временным ходом PC, как следствие, интенсивность магнитной бури (Dst_{min}) определяется величиной предшествующего максимума PC_{max} ; 9) отсутствие корреляции между E_{KL} и PC в $\sim 10\%$ рассмотренных суббурь свидетельствует о том, что в этих случаях солнечный ветер, зафиксированный спутником ACE на удалении $\sim 1,5$ млн км от Земли, не касался магнитосферы.

Ключевые слова: PC индекс, межпланетное электрическое поле, магнитосферные суббури, магнитные бури, взаимодействие солнечный ветер — магнитосфера — ионосфера.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время текущий прогноз космической погоды (с заблаговременностью менее 1 часа) осуществляется по измерениям параметров солнечного ветра на спутнике ACE в точке Лагранжа L1, где сила притяжения Солнца уравновешивается силой притяжения Земли (на расстоянии 1,5 млн км от Земли). Мониторинг геофизических процессов в магнитосфере — области, контролируемой магнитным полем Земли, основывается на данных наземных магнитных и авроральных наблюдений и спутниковых измерений параметров магнитосферной плазмы. В качестве показателей состояния магнитосферы обычно используются AL и AE индексы магнитной

возмущенности в авроральной зоне (как индикаторы магнитосферной суббури) и *Dst* индекс (как индикатор мировой магнитной бури).

Для описания связи между вариациями параметров солнечного ветра в точке Лагранжа и состоянием магнитосферы используются гипотетические функции взаимодействия (“coupling functions”), представляющие собой различные комбинации параметров солнечного ветра, коррелирующие наилучшим образом с теми или иными индикаторами состояния магнитосферы. К настоящему времени предложено более 15 разновидностей функции взаимодействия. Все эти функции были выведены, исходя из теоретических концепций или предположений о природе влияния солнечного ветра на магнитосферу, а не из каких-либо прямых экспериментальных данных. Реальные физические механизмы, определяющие взаимодействие между солнечным ветром и магнитосферой, не изучены и практически остаются неизвестными. Всесторонний анализ, проведенный в работах (Newell et al., 2007, 2008), показал, что разные функции взаимодействия хорошо коррелируют только с определенными магнитосферными характеристиками и при определенных физических условиях. Универсальная функция, если она существует, должна включать скорость солнечного ветра (V_{sw}) в 1-й (или немного большей) степени, тангенциальную компоненту ММП (B_T) в 1-й или немного меньшей степени и синус угла между тангенциальной компонентой ММП и геомагнитным диполем ($\theta_c/2$) во 2-й (или большей) степени. Оказалось, что этому условию наилучшим образом соответствует такая функция взаимодействия, как межпланетное электрическое поле, определенное по формуле (Kan, Lee, 1979):

$$E_{KL} = V_{sw} \cdot B_T^2 \cdot \sin^2(\theta_c/2). \quad (1)$$

В реальности для прогноза (наукастинга) состояния магнитосферы необходимы постоянные наблюдения на границе магнитосферы (магнитопаузе), там, где происходит действительный контакт солнечного ветра с магнитным полем Земли. Однако такие наблюдения принципиально нельзя реализовать, даже при наличии нескольких спутников, так как спутники движутся по своим орбитам, а магнитопауза все время меняет свое положение в пространстве. В этих обстоятельствах особое значение приобретает любая косвенная, спутниковая или наземная, оперативная информация о поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра. В работе (Troshichev, Janzhura, 2012) было предложено использовать в качестве индикатора этой энергии *PC* индекс магнитной активности в полярной шапке (рис. 1).

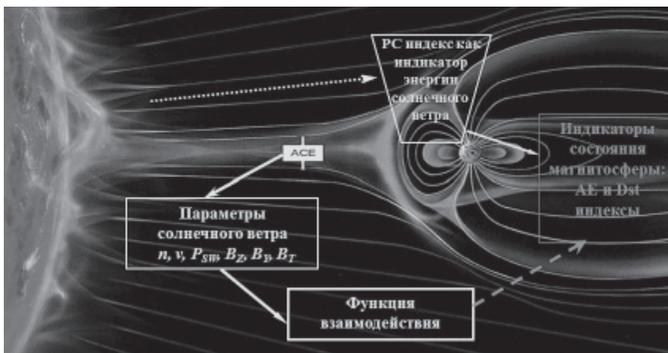


Рис. 1. Схематическая иллюстрация методов мониторинга взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА РС ИНДЕКСА

Как показывают измерения на спутниках (Armstrong, 1974), под воздействием солнечного ветра в магнитосфере постоянно генерируются «продольные» (текущие вдоль силовых линий геомагнитного поля) электрические токи, которые распределяются вдоль приполюсной (Region 1) и экваториальной (Region 2) границ аврорального овала. Продольные токи области R1 втекают в ионосферу на утренней стороне и вытекают из ионосферы на вечерней стороне овала, при этом их интенсивность определяется скоростью солнечного ветра и ориентацией межпланетного магнитного поля (Langel, 1975; McDiarmid et al., 1977; Iijima, Potemra, 1982) или в конечном счете межпланетным электрическим полем (Bythrow, Potemra, 1983). Под действием этих продольных токов в полярной ионосфере генерируются специфические системы электрических полей и токов, которые ответственны за магнитные DP2 возмущения (Kuznetsov, Troshichev, 1977; Gizler, Troshichev, 1979; Troshichev, Tsyganenko, 1979; Troshichev, 1982).

DP2 возмущения как особый тип магнитной активности, не зависящей от магнитных суббурь (DP1), были выделены в работе (Obayashi, 1967). Было показано (Nishida, 1968a,b; Nishida, Maezawa, 1971), что DP2 возмущения тесно связаны с южной (B_{ZS}) компонентой ММП. Распределение DP2 возмущений имеет наиболее однородный характер в околополюсной области, где векторы магнитного возмущения δF ориентированы приблизительно в направлении утро-вечер. Как показал анализ (Troshichev, Andrezen, 1985), DP2 возмущения наилучшим образом коррелируют с вариациями межпланетного электрического поля E_{KL} , определенного по формуле (Kan, Lee, 1979): $E_{KL} = V_{sw} \cdot (B_z^2 + B_y^2)^{1/2} \cdot \sin^2(\theta c/2)$. Это означает, что наземные наблюдения DP2 возмущений могут быть использованы для мониторинга поля E_{KL} , воздействующего на магнитосферу.

PC индекс был разработан и внедрен в практику (Troshichev et al., 1979; Troshichev, Andrezen, 1985; Troshichev et al., 1988) как индекс магнитной DP2 возмущенности, возникающей в полярной шапке (*Polar Cap*) при воздействии на магнитосферу межпланетного электрического поля E_{KL} . В основе методики определения PC индекса, детально описанной в монографии (Troshichev, Janzhura, 2012), лежит процедура определения статистически обоснованных параметров α , β и φ , характеризующих связь между величинами поля E_{KL} и магнитными DP2 возмущениями:

$$\delta F = \alpha E_{KL} + \beta, \quad (2)$$

где φ — угол, характеризующий ориентацию вектора δF относительно линии Земля — Солнце. Корреляционные соотношения между величинами δF и E_{KL} рассматривались при различных значениях угла φ , и то значение угла φ , при котором корреляция достигала максимальной величины, принималось как оптимальное (т.е. соответствующее действительному направлению вектора δF). Именно для этого угла φ фиксировались коэффициенты регрессии α и β , связывающие величины δF и E_{KL} .

Поскольку распределение векторов возмущения δF имеет наиболее однородный характер в центре полярной шапки, для анализа были использованы данные магнитных наблюдений на околополюсных станциях Северного и Южного полушарий. Как было показано в работе (Troshichev et al., 2011a), характер связи между межпланетным электрическим полем E_{KL} и магнитными DP2 возмущениями остается неизменным в цикле солнечной активности. Поэтому параметры α , β , и φ для станций Туле и Восток были определены по данным о E_{KL} и δF за полный цикл солнечной активности (за 1998–2009 гг.). Таблицы параметров α , β , и φ были получены, с 5-минутным разрешением, на каждый из 365 дней года.

В дальнейшем эти параметры использовались для оперативного расчет *PC* индекса по текущим данным о величине $DP2$ возмущений на станциях Туле и Восток

$$PC = \xi E_{KL} = \xi(\delta F - \beta)/\alpha, \quad (3)$$

где ξ — коэффициент размерности, принимаемый за единицу для удобства сопоставления *PC* индекса с межпланетным электрическим полем. Таким образом, *PC* индекс определяется как величина, пропорциональная интенсивности полярного магнитного возмущения (δF), прокалиброванная по амплитуде межпланетного электрического поля E_{KL} с учетом сезона и момента времени UT. Расчеты проводятся независимо для станций Туле (северный *PCN* индекс) и Восток (южный *PCS* индекс). Как показал анализ (Troshichev et al., 2006), различие между полем E_{KL} , измеренным на спутнике ACE, и *PC* индексами, рассчитанными по наземным магнитным данным, не превышает, в среднем, 1 мВ/м.

На основании работ (Troshichev, Janzhura, 2009; Troshichev et al., 2011a,b), где анализировалась связь магнитной активности в полярных шапках с развитием магнитосферных суббурь и магнитных бурь, был сделан вывод (Troshichev and Janzhura, 2012), что *PC* индекс можно рассматривать как индикатор энергии солнечного ветра, поступающей в магнитосферу. В этом качестве *PC* индекс был одобрен в 2013 г. Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавтики (XII Ассамблея МАГА, г. Мерида, Мексика) как новый международный индекс магнитной активности. Принципиальное отличие *PC* индекса от индексов магнитной активности *AL/AE* и *Dst*, введенных в практику полвека назад, заключается в том, что *PC* индекс свидетельствует об энергии солнечного ветра, поступающей в магнитосферу, тогда как «авроральные» *AL/AE* индексы и *Dst* индекс показывают, какая часть энергии, аккумулированной ранее в магнитосфере, реализуется в форме магнитосферных суббурь и магнитных бурь. В данной работе суммируются последние результаты детального анализа связи *PC* индекса с поведением межпланетного электрического поля E_{KL} , с одной стороны, и связи *PC* индекса с развитием магнитных суббурь и бурь, с другой стороны.

PC ИНДЕКС И РАЗВИТИЕ МАГНИТНЫХ СУББУРЬ

Чтобы получить надежные количественные соотношения между поведением магнитной активности в полярных шапках и развитием магнитных суббурь, были рассмотрены все суббури с внезапным началом (SO), наблюдавшиеся в период максимума солнечной активности (1998–2001 гг.). Под магнитной суббурей с внезапным началом подразумевается магнитное возмущение в авроральной зоне с резким увеличением амплитуды (не менее 100 нТл) за временной интервал < 10 мин. За рассматриваемый период было выделено 1798 событий, удовлетворяющих этому требованию: 195 событий (12 %), стартовавших на фоне спокойного поля, были квалифицированы как изолированные суббури; 1418 возмущений, наблюдавшихся на фоне повышенной магнитной активности, были квалифицированы как «развитые» суббури; 153 возмущения, которым предшествовал долгий период неизменной (низкой или умеренной) магнитной активности в авроральной зоне и в полярной шапке, были квалифицированы как «задержанные» суббури. В 32 случаях (< 2 %) не наблюдалось какой-либо связи между изменениями в *PC* и *AL* индексах, и они были исключены из рассмотрения. Для анализа использовался метод наложенных эпох, что позволило выявить характер поведения *PC* и *AL* индексов в различных условиях.

Рассмотрение количественных соотношений между поведением PC индекса и развитием суббурь с внезапным началом показало (Troshichev et al., 2014), что рост PC индекса всегда предшествует или совпадает с внезапным началом суббури. При этом не было выявлено какой-либо зависимости момента начала и интенсивности суббури от длительности фазы роста PC индекса: магнитуда внезапного начала не только не возрастает, а наоборот, показывает тенденцию к уменьшению при увеличении фазы роста PC индекса. При более детальном рассмотрении временной эволюции PC индекса перед внезапным началом суббури оказалось, что действительным триггером внезапного начала суббури является «скачок PC » — резкий рост PC индекса на фоне ранее неизменного или медленно увеличивающегося уровня PC или «реверс PC » — рост PC индекса после кратковременного уменьшения его величины.

Статистический анализ соотношений между PC и AL индексами был проведен для изолированных и развитых суббурь при разделении суббурь на подгруппы в соответствии с величиной PC индекса в момент внезапного начала (PC_0) и сигнатурами поведения PC индекса перед SO . Рис. 2 дает примеры временной эволюции PC и AL индексов в ходе развитых суббурь с сигнатурой «скачок PC » для трех наиболее статистически обоснованных уровней PC_0 : 1, 1,5 и 2 мВ/м. Тонкие линии на рис. 2 представляют временную эволюцию PC и AL индексов в ходе индивидуальных событий, толстая сплошная линия показывает поведение средних для данной подгруппы суббурь значений PC и AL . Можно видеть, что внезапное начало магнитных суббурь связано с резким ростом величины PC , происходящим либо перед SO , либо одновременно с SO .

Средние величины PC и AL были рассчитаны для всех подгрупп суббурь с числом событий $N > 3$. В итоге был получен временной ход средних значений PC и AL для 18 подгрупп изолированных суббурь и для 45 подгрупп развитых суббурь. Независимо от типа суббури, принципиально важным является факт резкого увеличения скорости

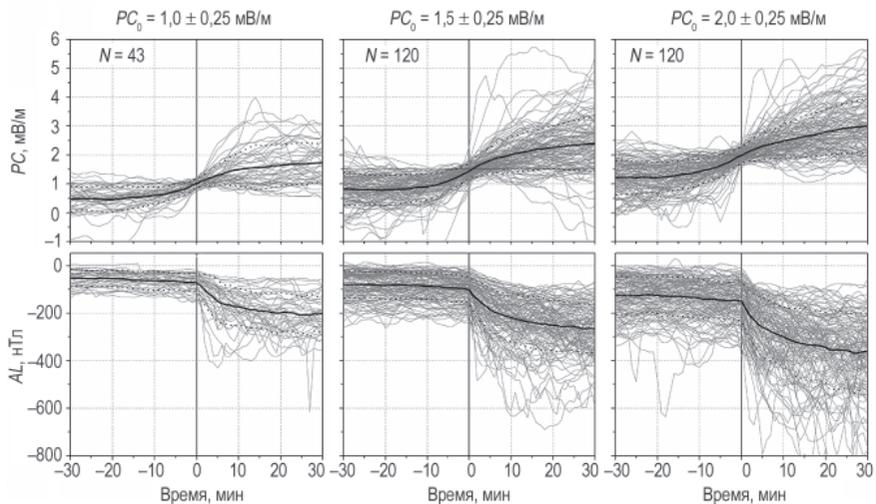


Рис 2. Временная эволюция индексов PC и AL в ходе суббурь со скачком PC индекса, предшествующим началу суббури, при значениях PC_0 : 1, 1,5 и 2 мВ/м. Тонкие линии показывают изменения PC и AL индексов в ходе индивидуальных событий, толстая сплошная линия представляет поведение средних для данной подгруппы суббурь значений PC и AL .

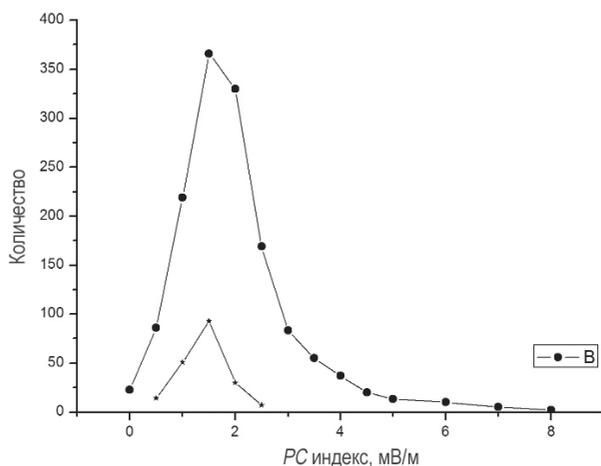


Рис. 3. Распределение числа изолированных (слева) и развитых (справа) суббурь по величинам PC_0 . роста PC индекса на фоне предшествующего периода медленного роста, или стагнации, или кратковременного уменьшения PC . Скорость роста PC не изменяется в связи с началом суббури, и рост PC индекса, начавшийся перед внезапным началом, продолжается и после SO. Магнитная возмущенность в авроральной зоне (AL индекс) остается неизменной (или незначительно увеличивается) вплоть до момента SO.

Рис. 3 показывает распределение числа изолированных (нижняя кривая) и развитых (верхняя кривая) суббурь по величинам PC_0 . Большинство изолированных суббурь начинается при величине PC_0 от 1 до 2 мВ/м. Развитые суббури могут начинаться как при низком ($PC_0 < 0,5$ мВ/м), так и высоком ($PC_0 > 4,5$ мВ/м) уровне магнитной активности в полярной шапке, однако 77 % развитых суббурь приходится на интервал $PC_0 = 1 \dots 2,5$ мВ/м.

Зная ход средних значений PC и AL для суббурь с разными уровнями PC_0 , легко вывести статистически обоснованное соотношение между величинами AL и PC для любого момента в ходе суббури. Рис. 4 показывает соотношение между AL и PC на фазе роста (в моменты T_0 , $T_0 - 5$ мин, $T_0 - 20$ мин) и на фазе экспансии суббури (момен-

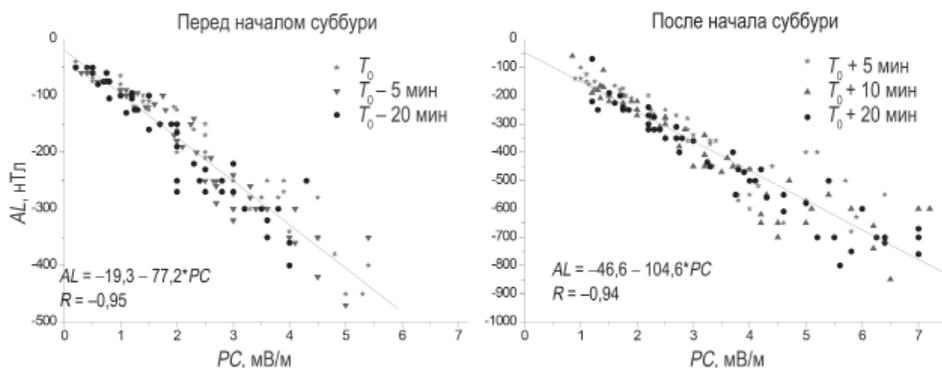


Рис. 4. Соотношение между AL и PC индексами перед внезапным началом суббури (моменты T_0 , $T_0 - 5$ мин, $T_0 - 20$ мин) и после начала суббури (моменты $T_0 + 5$ мин, $T_0 + 10$ мин и $T_0 + 20$ мин) в случае изолированных и развитых суббурь.

ты $T_0 + 5$ мин, $T_0 + 10$ мин, и $T_0 + 20$ мин) для развитых суббурь. Можно видеть, что величины AL и PC связаны линейным законом независимо от типа суббури. В случае изолированных суббурь зависимость AL от PC после внезапного начала оказывается почти в 2 раза сильнее, чем перед началом суббури. Очевидно, что эта закономерность является результатом усиления ионосферных токов в авроральной зоне после начала суббури в связи с резким ростом потока вторгающихся в зону авроральных частиц и соответствующим увеличением проводимости ионосферы.

СВЯЗЬ PC ИНДЕКСА С МЕЖПЛАНЕТНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ E_{KL}

Связь PC индекса с межпланетным электрическим полем E_{KL} анализировалась за период 1998–2001 гг. для тех же магнитных суббурь, что и в предыдущем разделе. Рассматривался временной ход E_{KL} и PC за 1-часовой интервал времени, предшествующий внезапному началу (SO). Величина PC индекса бралась как среднее из величин PC_N и PC_S индексов, получаемых по данным станций Туле и Восток. Кроме того, в пределах того же списка суббурь были выделены, вне зависимости от SO, «координированные» события ($N = 281$), в которых изменения PC индекса четко следовали вариациям поля E_{KL} . Координированные события, как правило, опережают 1-часовой интервал, предшествующий SO.

Корреляция между E_{KL} и PC рассчитывалась отдельно для каждого события при различных величинах смещения во времени значений PC относительно E_{KL} (в интервале от 0 до 45 мин). Для событий с суббурями в качестве ключевой даты T_0 выбирался момент внезапного начала суббури и корреляция между величинами E_{KL} и PC рассчитывалась в пределах 1-часового интервала, предшествующего внезапному началу суббури. Для координированных событий в качестве ключевой даты выбирался момент внезапного увеличения поля E_{KL} , и корреляция между величинами E_{KL} и PC рассчитывалась в течение интервала $T_0 \pm 30$ мин. Величина временного смещения, при котором корреляция между E_{KL} и PC достигала максимума, рассматривалась как время задержки в отклике PC индекса на изменения поля E_{KL} . События с суббурями разделялись на подгруппы в соответствии с величиной PC индекса в момент внезапного начала: $PC_0 = 0,5 \pm 0,25$ мВ/м, $PC_0 = 1 \pm 0,25$ мВ/м, $PC_0 = 1,5 \pm 0,25$ мВ/м, $PC_0 = 2 \pm 0,25$ мВ/м и т.д.

В верхнем ряду рис. 5 показано распределение числа событий по величине корреляции между E_{KL} и PC для изолированных и развитых суббурь и координированных событий. Корреляция $R > 0,5$ типична для ~90 % изолированных суббурь, для ~80 % развитых суббурь и практически для всех координированных событий (что было предопределено методом отбора этих событий). Это означает, что изменения индекса PC в период, предшествующий внезапному началу суббури, определялись вариациями поля E_{KL} . При этом корреляция оказывается низкой ($R < 0,5$) или даже отрицательной примерно для 10 % изолированных суббурь. Поскольку отбор событий для анализа определялся реально наблюдаемым внезапным началом суббури, это означает, что солнечный ветер, фиксируемый спутником ACE в точке либрации, проходил мимо (т.е. не касался земной магнитосферы) в этих случаях. Отсюда следует вывод, что PC индекс, определяемый по наземным магнитным данным, является более реальным показателем геоэффективности солнечного ветра, чем поле E_{KL} , рассчитываемое по измерениям параметров солнечного ветра на расстоянии ~ 1,5 млн км от Земли.

Нижний ряд на рис. 5 показывает распределение тех же событий по временам задержки ΔT , при этом учитывались только события с высоким коэффициентом корреляции ($R > 0,75$) между PC и E_{KL} . Можно видеть, что величина временных за-

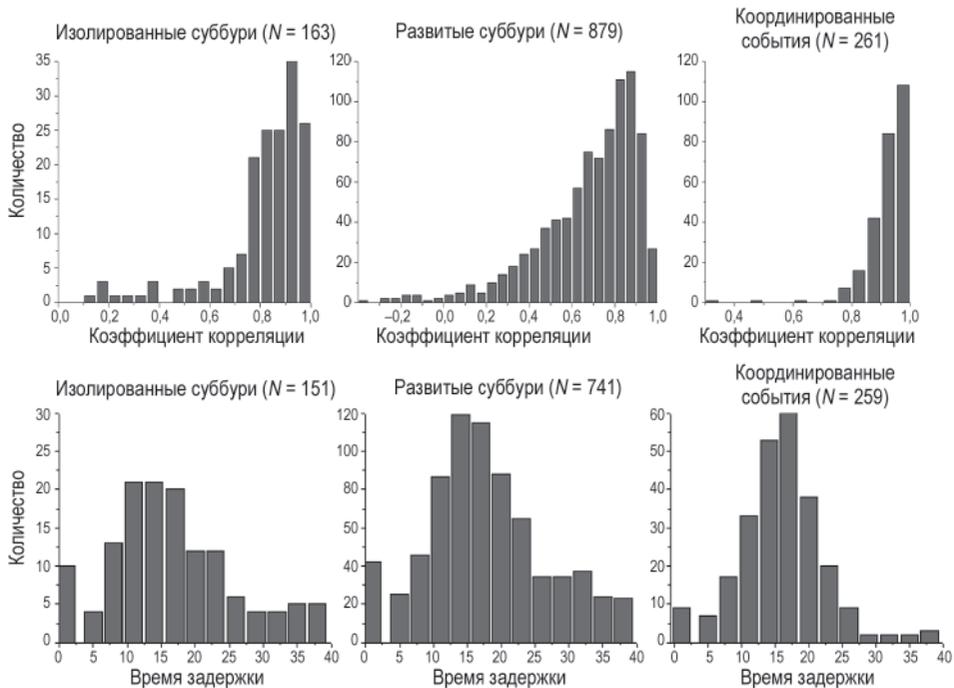


Рис. 5. Распределение числа событий по величине корреляции между вариациями поля E_{KL} и изменениями PC индекса (верхняя панель) и по временам задержки ΔT между E_{KL} и PC (нижняя панель) в случае изолированных и развитых суббурь и координированных событий.

держек ΔT лежит в интервале от 0 до 40 мин с отчетливо выраженным максимумом на 15–18 минутах и вторичным максимумом на $\Delta T \sim 0$. Минимальная повторяемость событий вне этих максимумов может быть приписана случайным ошибкам из-за неверной оценки времени переноса поля E_{KL} от точки либрации к границе магнитосферы. Аналогичный результат получается при разделении развитых суббурь на подгруппы согласно уровню PC_0 (от $PC_0 = 0,5$ мВ/м до $PC_0 = 3,0$ мВ/м), что означает, что величина времени задержки в отклике PC на изменения поля E_{KL} не связана с интенсивностью суббури.

Следует особо отметить события с нулевой задержкой во времени ($\Delta T = 0$) между изменениями поля E_{KL} и PC индекса. Число таких событий значительно превышает минимальную повторяемость событий, которая может быть приписана случайным ошибкам в оценке транспортного времени поля E_{KL} . Кроме того, как показывает наш анализ, нулевые задержки $\Delta T = 0$ типичны для событий с резким и сильным скачком величины поля E_{KL} , которые сопровождаются почти одновременным развитием интенсивных магнитных суббурь.

Чтобы выявить факторы, определяющие величину времени задержки ΔT , была рассмотрена связь ΔT с такими параметрами солнечного ветра, как скорость (V_{sw}) и динамическое давление (Pd) солнечного ветра, тангенциальная (B_r) и вертикальная (B_z) компоненты межпланетного магнитного поля. В случае изолированных и развитых суббурь рассматривались величины V_{sw} , Pd , B_r и B_z , усредненные за 1-часовой интервал, предшествующий внезапному началу, в случае координированных собы-

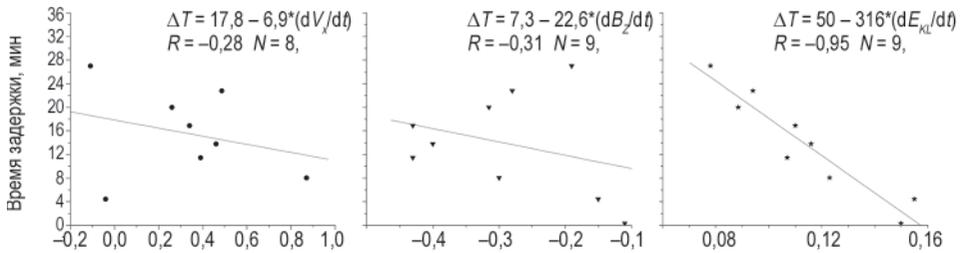


Рис. 7. Время задержки ΔT как функция скорости изменения величин dV_x/dt , dB_z/dt и dE_{KL}/dt .

тий — величины V_{sw} , Pd , B_T и B_Z , усредненные за интервал $T_0 \pm 30$ минут. Как показали результаты анализа, время задержки ΔT практически не зависит (коэффициент корреляции $|R| < 0,25$) от указанных параметров солнечного ветра.

Чтобы выявить действительные факторы, определяющие время задержки в реакции PC индекса на изменения поля E_{KL} , были рассмотрены координированные события, демонстрирующие наилучшую корреляцию между E_{KL} и PC . Координированные события были разделены на группы соответственно времени задержки ΔT , и для каждой группы с фиксированным временем ΔT был определен, методом наложения эпох, типичный ход параметров солнечного ветра, E_{KL} и PC , при этом в качестве нулевой даты ($T = 0$) выбирался момент внезапного роста поля E_{KL} . На рис. 6 цв. вклейки показан, в качестве примера, временной ход таких параметров, как радиальная V_x компонента скорости солнечного ветра, вертикальная B_z компонента ММП, поле E_{KL} и индекс PC для трех групп координированных событий с временами задержки $\Delta T = 12\text{--}15$ мин, $16\text{--}18$ мин и $19\text{--}21$ мин. Жирная черная линия — поведение усредненных по каждой группе параметров V_x , B_z , E_{KL} и PC . Внезапное начало роста поля E_{KL} и соответствующий скачок PC индекса отмечены вертикальными красными линиями, временной интервал между которыми как раз и характеризует время задержки ΔT . Из этих данных легко получить временной ход средних величин V_x , B_z , E_{KL} и оценить их изменения за время ΔT . Таким образом были рассчитаны градиенты dV_x/dt , dB_z/dt и dE_{KL}/dt для каждой группы координированных событий с фиксированным временем задержки ΔT . На рис. 7 представлено соотношение между величинами dV_x/dt , dB_z/dt и dE_{KL}/dt и ΔT в интервале величин ΔT от 0 до 28 мин. Как свидетельствуют полученные результаты, временная задержка в реакции PC индекса на вариации параметров солнечного ветра определяется исключительно скоростью роста межпланетного электрического поля E_{KL} , а не изменением отдельных параметров солнечного ветра, даже таких геоэффективных, как V_x и B_z . Можно видеть, что при очень больших значениях dE_{KL}/dt временная задержка ΔT падает до минимума.

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ РС ИНДЕКСОМ И РАЗВИТИЕМ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Динамика развития и интенсивность магнитных бурь обычно характеризуются Dst индексом (Akasofu, Chapman, 1972). Для анализа соотношений между PC и Dst индексами магнитные бури были разделены на 3 класса: «классические», «замедленные» (delayed) и «растянутые» (stretched) бури. «Классической» была названа буря, которая в соответствии с определением (Akasofu, Chapman, 1972) демонстрирует быстрое развитие главной фазы с одним четко выраженным максимумом депрессии

и медленным возвратом к исходному уровню. «Замедленная» буря — это буря с четко выраженным максимумом депрессии, но с нерегулярной и продолжительной фазой роста. «Растянутая» буря — буря с растянутой во времени главной фазой или с несколькими повторяющимися максимумами депрессии. В анализ были включены все магнитные бури с интенсивностью ($Dst < -30$ нТл) и продолжительностью >12 ч, наблюдавшиеся в эпоху солнечного максимума (1998–2004 гг.). Бури были разделены на 5 категорий, в соответствии с их интенсивностью: 30–60 нТл, 60–90 нТл, 90–120 нТл, 120–200 нТл, 200–400 нТл.

Геомагнитные бури являются результатом суперпозиции противоположно действующих эффектов токов DCF, текущих по магнитопаузе (увеличение поля), и кольцевых токов DR, формирующихся во внутренней магнитосфере (депрессия магнитного поля). Суммарный эффект этих токов, различный на разных фазах бури, зависит от внешних условий и предистории бури и меняется от одного события к другому. Чтобы устранить неопределенность в идентификации начала депрессии магнитного поля, желательно иметь критерии, не зависящие от соотношения DCF и DR токов. В качестве такого критерия мы взяли величину $PC = 1,5 \pm 0,5$ мВ/м, которая, как показано выше, является также порогом PC , необходимым для развития магнитных суббурь.

Рис. 8 показывает в качестве примера соотношение между PC и Dst индексами в начальный период развития «задержанных» бурь, если за нулевое время брать момент устойчивого перехода H индекса через пороговое значение $PC = 1,5 \pm 0,5$ мВ/м (бури разделены на категории в соответствии с их интенсивностью (величиной максимальной депрессии геомагнитного поля)). Из рис. 8 следует, что развитие депрессии геомагнитного поля (начало главной фазы) четко связано с устойчивым переходом PC индекса через пороговое значение $PC \sim 1,5$ мВ/м.

Корреляция между PC и Dst индексами рассматривалась для 10-часовых интервалов, предшествующих моменту максимума магнитной бури (Dst_{min}) при

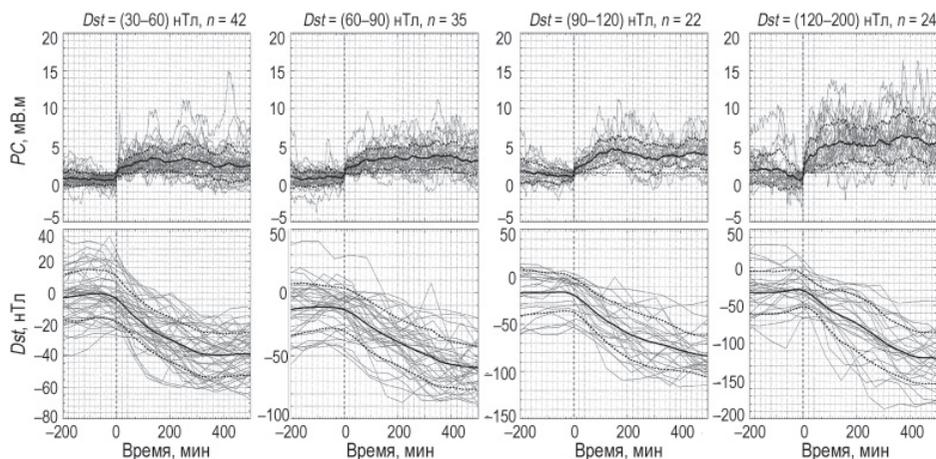


Рис. 8. Соотношение между временным ходом PC и Dst индексов в начальный период развития «замедленных» магнитных бурь различной интенсивности. За нулевое время ($T = 0$) взят момент устойчивого перехода PC индекса через пороговое значение $PC = 1,5 \pm 0,5$ мВ/м. Тонкие линии — вариации PC и Dst индексов в ходе индивидуальных событий. Жирная линия — поведение усредненных PC и Dst индексов.

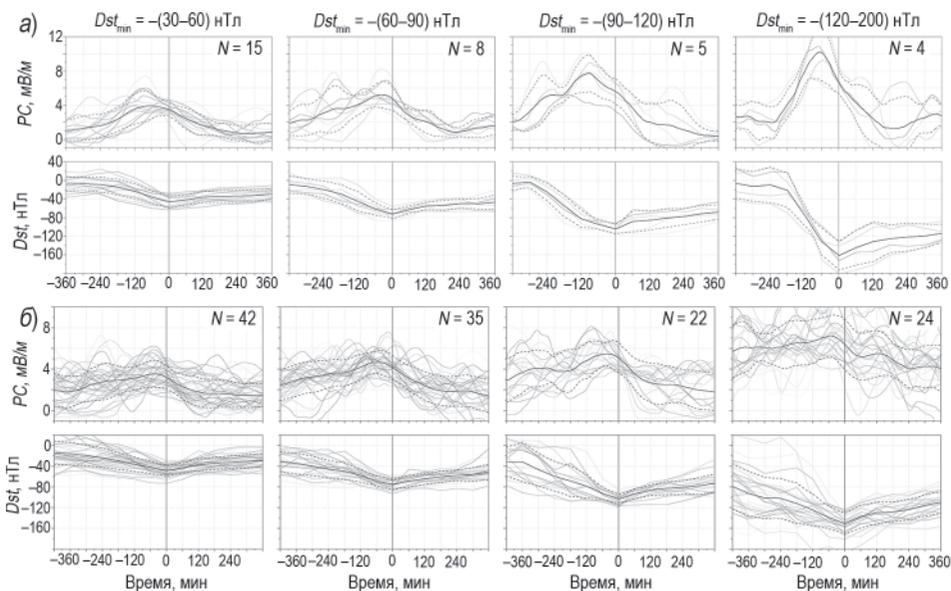


Рис. 9. Соотношение между Dst индексом и сглаженным PC индексом для классических и замедленных магнитных бурь различной интенсивности при выборе в качестве ключевой даты ($T=0$) времени максимальной депрессии магнитного поля Dst_{\min} : а — «классическая» буря, б — «замедленная» буря.

различной ширине бегущего окна сглаживания 1-минутного PC индекса и для разных значений времени смещения PC индекса относительно Dst (от 15 до 180 мин). Величина смещения, при которой корреляция между PC и Dst достигала максимума, определялась как время задержки ΔT в реакции Dst индекса на изменения PC . Оказалось, что корреляция между Dst и сглаженным PC индексом достигает максимума при времени задержки $\Delta T = 30-80$ мин. При этом моменту максимальной депрессии геомагнитного поля Dst_{\min} всегда предшествует максимальный уровень величины PC индекса. Временная задержка между PC и Dst стабилизируется при ширине окна сглаживания более 60 мин и величина PC_{\max} практически не меняется при дальнейшем увеличении ширины окна.

Рис. 9 показывает соотношение между Dst индексом и 90-минутным сглаженным PC индексом для классических и замедленных магнитных бурь различной интенсивности при выборе момента максимальной депрессии магнитного поля Dst_{\min} в качестве ключевой даты. Можно видеть, что классические бури отличаются от замедленных бурь только длительностью развития главной фазы: 3–5 ч в первом случае и 5–8 ч во втором. Во всех случаях PC индекс достигает максимума за 60 ± 15 мин до момента максимума магнитной бури (Dst_{\min}), независимо от уровня PC_{\max} и интенсивности бури. Наиболее мощные магнитные бури с $Dst = -(200-400)$ нТл (не показанные на рис. 10) демонстрируют ту же закономерность.

Рис. 10, на котором дано соотношение между величинами PC_{\max} и Dst_{\min} для всех категорий интенсивности классических и замедленных магнитных бурь, показывает, что интенсивность бури (Dst_{\min}) линейно связана с величиной PC_{\max} , предшествующей моменту максимальной депрессии.

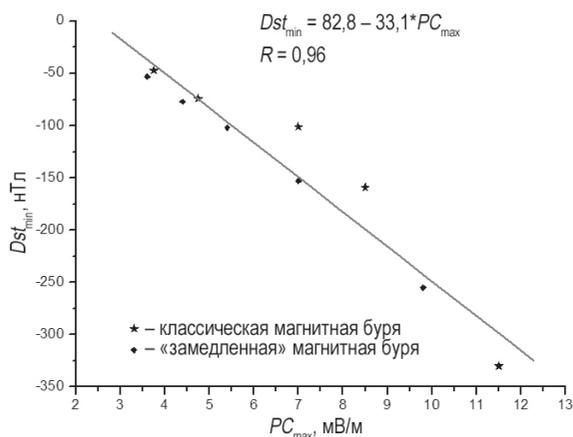


Рис. 10. Зависимость интенсивности магнитной бури Dst_{\min} от усредненной величины индекса PC_{\max} , полученная при рассмотрении всех классических и «замедленных» магнитных бурь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение соотношений между PC и AL индексами в ходе изолированных и развитых магнитных суббурь (Troshichev et al., 2014) выявило строгую закономерность во временном ходе магнитной активности в полярной шапке и развитии магнитных возмущений в авроральной зоне: магнитным суббурям всегда предшествует рост PC индекса; суббури, как правило, начинают развиваться, когда PC индекс превышает некоторое пороговое значение ($\sim 1,5 \pm 0,5$ мВ/м); момент внезапного начала суббури связан с резким увеличением скорости роста PC индекса; величина AL линейно зависит от PC индекса независимо от типа и интенсивности суббури; зависимость AL от PC резко усиливается после внезапного начала суббури.

Ход PC индекса в большинстве рассмотренных событий определяется вариациями межпланетного электрического поля E_{KL} (коэффициент корреляции $R > 0,7$) в период, предшествующий внезапному началу суббури. В $\sim 10\%$ событий солнечный ветер, который измерялся спутником ACE в точке Лагранжа, в реальности не контактировал с магнитосферой. При идеальной корреляции между E_{KL} и PC ($R > 0,75$) временная задержка ΔT в отклике PC на изменения E_{KL} (смещенного к границе магнитосферы) лежит в интервале от 0 до 35 мин с максимумом на 15–20 минутах. Малые времена задержки между E_{KL} и PC типичны для событий с резким и большим скачком величины поля E_{KL} . Величина задержки ΔT не зависит от таких параметров солнечного ветра, как скорость V_X или ММП компонента B_Z , но определяется скоростью роста поля E_{KL} (с коэффициентом корреляции $R = -0,93$).

Магнитные бури начинают развиваться, когда PC индекс устойчиво превышает пороговый уровень $\sim 1,5$ мВ/м (как и в случае магнитных суббурь). Ход магнитной бури (длительность фазы роста и главной фазы, интенсивность возмущения, чередование депрессий) определяется поведением сглаженного PC индекса, при оптимальной ширине окна сглаживания ~ 60 – 90 мин. Интенсивность магнитной бури определяется, с временной задержкой ~ 1 ч, предшествующим уровнем PC_{\max} .

Эти экспериментальные факты убедительно свидетельствуют о том, что PC индекс является индикатором поступающей в магнитосферу энергии солнечного ве-

тра. *PC* индекс дает возможность предвидеть начало и ход развития магнитосферных возмущений и оценить их интенсивность. При условии оперативного получения *PC* индекс может использоваться для целей количественного мониторинга и текущего прогноза состояния магнитосферы. Архив данных о *PC* индексе (за 1997–2014 гг.) и текущие значения *PCN* и *PCS* индексов представлены на сайте: <http://pc-index.org>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.-И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика. М.: Мир, 1972. 384 с.
- Armstrong J.C.* Field-aligned currents in the magnetosphere // *Magnetospheric Physics*. Reidel, Dordrecht, Netherland, 1974. 144 p.
- Bythrow P.F., Potemra T.A.* The relationship of total Birkeland currents to the merging electric field // *Geophys. Res. Lett.* 1983. Vol. 10. P. 573–576.
- Dungey J.W.* Interplanetary magnetic field and the auroral zones // *Phys. Res. Lett.* 1961. Vol. 6. P. 47–48.
- Gizler V.A., Semenov V.S., Troshichev O.A.* The electric fields and currents in the ionosphere generated by field-aligned currents observed by TRIAD // *Planet Space Sci.* 1979. Vol. 27. P. 223–231.
- Iijima T., Potemra T.A.* The relationship between interplanetary quantities and Birkeland current densities // *Geophys. Res. Lett.* 1982. Vol. 4. P. 442–445.
- Kan J.R., Lee L.C.* Energy coupling function and solar wind-magnetosphere dynamo // *Geophys. Res. Lett.* 1979. Vol. 6. P. 577.
- 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.
- Langel R.A.* Relation of variations in total magnetic field at high latitude with parameters of the IMF and with DP2 fluctuations // *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. P. 1261–1270.
- McDiarmid I.B., Burrows J.R., Wilson M.D., Burrows J.R.* Reverse polarity field-aligned currents at high latitudes // *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. P. 1513–1518.
- Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J.* A nearly universal solar wind magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. A01206, doi:10.1029/2006JA012015.
- Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Rich F.J.* Pairs of solar wind-magnetosphere coupling functions: combining a merging term with a viscous term works best // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113 (A4). 1–10, doi: 10.1029/2007JA012825.
- Nishida A.* Geomagnetic DP2 fluctuations and associated magnetospheric phenomena // *J. Geophys. Res.* 1968a. Vol. 73. P. 1795–1803.
- Nishida A.* Coherence of geomagnetic DP2 fluctuations with interplanetary magnetic variations // *J. Geophys. Res.* 1968b. Vol. 73. P. 5549.
- Nishida A., Maezawa K.* Two basic modes of interaction between the solar wind and the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1971. Vol. 76. P. 2254–2264.
- Obayashi T.* The interaction of solar plasma with geomagnetic field, disturbed conditions / King J.W., Newman W.S. (eds) // *Solar terrestrial physics*. N.Y. 1967. 107 p.
- Troshichev O.A., Tsyganenko N.A.* Correlation relationships between variations of IMF and magnetic disturbances in the polar cap // *Geomag. Research.* 1979. Vol. 25. P. 47–59 (in Russian).
- 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.
- Troshichev O.A.* Polar magnetic disturbances and field-aligned currents // *Space Sci Rev.* 1982. Vol. 32. P. 275–360.

Troshichev O.A., Andrezen V.G. The relationship between interplanetary quantities and magnetic activity in the southern polar cap // *Planet Space Sci.* 1985. Vol. 33. P. 415.

Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerstrøm S., Friis-Christensen E. Magnetic activity in the polar cap – A new index // *Planet Space Sci.* 1988. Vol. 36. P. 1095.

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.

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.

Troshichev O.A., Podorozhkina N.A., Janzhura A.S. Invariability of relationship between the polar cap magnetic activity and geoeffective interplanetary electric field // *Ann. Geophys.* 2011a. Vol. 29. P. 1479–1489. doi:10.5194/angeo-29-1479-2011.

Troshichev O., Sormakov D., Janzhura A. Relation of PC index to the geomagnetic storm Dst variation // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011b. Vol. 73. P. 611–622. doi:10.1016/j.jastp.2010.12.015.

Troshichev O., Janzhura A. Space weather monitoring by ground-based means: PC index. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2012. 288 p. doi:10.1007/978-3-642-16803-1.

Troshichev O.A., Podorozhkina N.A., Sormakov D.A., Janzhura A.S. PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere: 1. Development of magnetic substorms // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2014. Vol. 119. doi:10.1002/2014JA019940.

O.A. TROSHICHEV

PC INDEX AS A NEW GROUND-BASED MEANS FOR EXPLORATION OF SHORT-TERM CHANGES IN SPACE WEATHER AND MAGNETOSPHERE STATE

The *PC* index has been initially introduced as an indicator of the polar cap magnetic activity, generated by the geoeffective interplanetary electric field E_{KL} . The 1-min *PC* index is calculated independently for the northern and southern hemisphere from data of the near-polar magnetic observatories Qaanaaq in Greenland (*PCN*) and Vostok in Antarctica (*PCS*), with use of the unified method. The *PC* index is a IAGA-endorsed index and proxy of the solar wind energy input into the magnetosphere (XII IAGA Assembly Resolutions, 2013). The following experimental facts are indicative of this distinctive property of the *PC* index: (1) magnetic storms and substorms are always preceded by *PC* index growth, (2) the *PC* index behavior before the substorm sudden onset (SO) is perfectly related to variations of the E_{KL} field, (3) the substorm onsets are commonly associated with a sharp increase in the *PC* (and E_{KL}) growth rate, (4) delay time ΔT in the *PC* response to solar wind disturbances is controlled by the E_{KL} growth rate (dE_{KL}/dt), (5) the substorm occurrence reaches the maximum when *PC* exceeds the value of $\sim (1,5 \pm 0,5)$ mV/m, (6) linear correlation between the *PC* and *AL* values is typical for all classes of the substorms, (7) the magnetic storm main phase starts to develop as soon as the *PC* index steadily exceeds the threshold level of 1,5 mV/m, (8) the maximal depression of magnetic field follows the *PC* maximum with a delay of ~ 1 hour, the storm intensity (Dst_{min}) being linearly depending on PC_{max} value, (9) correlation between E_{KL} and *PC* was absent in $\sim 10\%$ of the examined events when the solar wind observed by the ACE spacecraft at L1 position passed by the magnetosphere.

Keywords: *PC* index, interplanetary electric field, magnetospheric substorms, magnetic storms, solar wind — magnetosphere — ionosphere coupling.

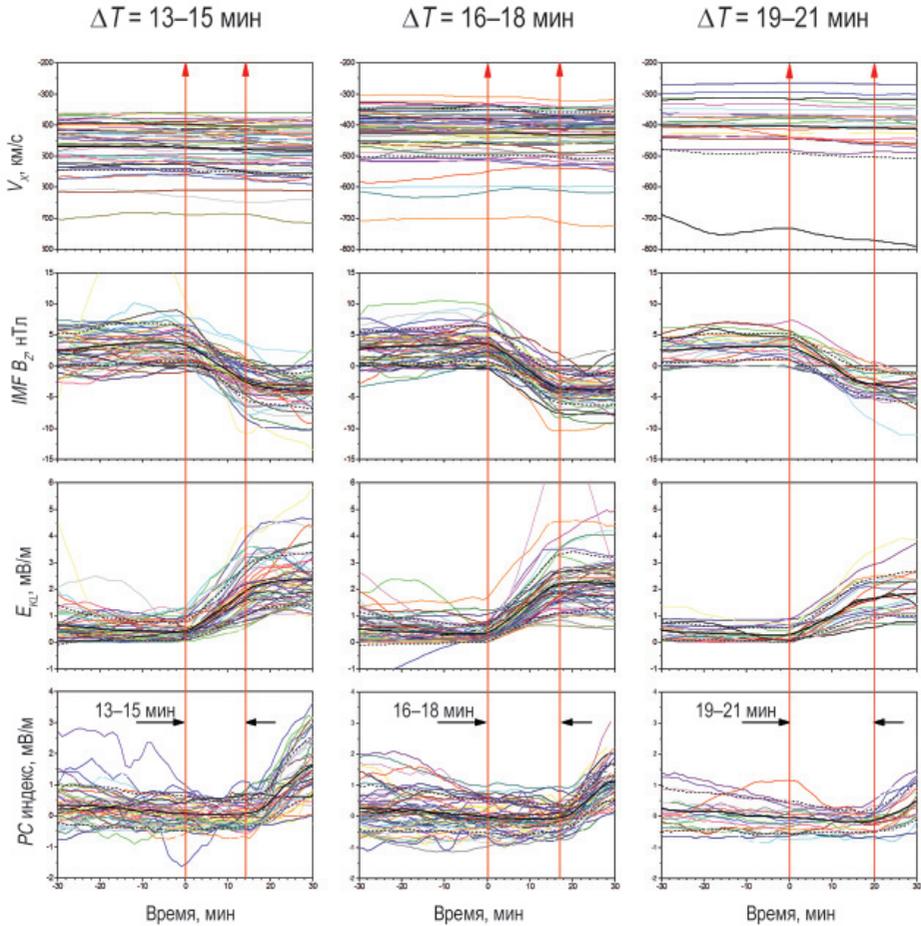


Рис. 6. Временной ход радиальной V_x компоненты скорости солнечного ветра, вертикальной B_z компоненты ММП, межпланетного электрического поля E_{KL} и индекса PC для координированных событий с временем задержки $\Delta T = 12\text{--}15$ мин, $\Delta T = 16\text{--}18$ мин и $\Delta T = 19\text{--}21$ мин. Тонкие линии представляют вариации указанных параметров в ходе индивидуальных событий. Жирная черная линия — поведение усредненных по каждой группе параметров V_x , B_z , E_{KL} и PC .