

УДК 551.510:523

СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОШИРОТНОЙ АТМОСФЕРЫ С СОЛНЕЧНО-КОСМИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

© 2013 г. В. Я. Вовк, Л. В. Егорова, В. А. Ульев

ГУ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

e-mail: eglar@aari.nw.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011 г.

После доработки 03.08.2011 г.

Рассмотрены ежесуточные данные температур в высокоширотных областях северного и южного полушарий и соответствующие им значения потоков солнечных протонов, магнитных PC , Ap и Dst -индексов. Показан характер вариаций приземной температуры в зависимости от этих индексов в разные сезоны во время сильных магнитных бурь, когда значение амплитуды Dst -индекса было меньше -50 . Выявлена связь индексов южной и северной атмосферных осцилляций (SOI и NAO) с Ap -индексами. Среднемесячная амплитуда Ap -индекса увеличивается перед началом теплого периода Эль-Ниньо, когда индекс SOI уменьшается с 0 до -1.5 , а индекс NAO увеличивается с -0.5 до 0.9 . После уменьшения Ap -индекса начинается холодный период Ла-Нина, при котором происходит рост индекса SOI с -0.1 до 1.3 и падение индекса NAO с 0.7 до -0.45 .

DOI: 10.7868/S001679401302017X

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [Пудовкин и Бабушкина, 1990; Вовк и др., 1997; Пудовкин и др., 1997; Веретененко и др., 2008; Ракипова и Вишнякова, 1984] показано, что помимо волнового излучения Солнца на характеристики нижней атмосферы высоких широт влияют потоки солнечных протонов с энергиями в десятки и сотни МэВ, которые проникают в тропосферу. Важным фактором также является динамика солнечного ветра, который воздействует на характер ионосферной конвекции в полярной шапке и на плотность токов ионосфера–Земля в глобальной электрической цепи [Troshichev et al., 2003; Troshichev et al., 2008; Tinsly et al., 1989; Tinsly and Deen, 1991; Troshichev et al., 2006; Вовк и Егорова, 2009]. Увеличение числа электрических зарядов в атмосфере способствует росту эффективности собирания аэрозольными частицами падающих капель в 30 раз [Tinsly and Deen, 1991]. Результатом данного процесса является образование ледяных частиц в облаках, состоящих из переохлажденной воды и, соответственно, уменьшение прозрачности атмосферы, что является причиной изменения температурного режима в нижележащих слоях атмосферы.

2. ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ (СКЛ) НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Для оценки связи вариаций температурных характеристик с потоками СКЛ в полярной шапке

были взяты данные ст. “Восток”, ($\varphi = -78.5^\circ S$, за зимний сезон лет высокой солнечной активности (CA) 1978–1979 гг., когда числа Вольфа $W = 92-155$). Использовались данные приземной температуры и риометрического поглощения космического шума в период поглощения типа полярной шапки (ППШ). Для анализа был использован метод наложения эпох, в качестве ключевого дня брался день максимума поглощения. Поглощению предшествовали потоки СКЛ с энергиями протонов $E > 30$ МэВ. Сравнивался усредненный по 15-ти событиям ход вышеназванных параметров, он приведен на рис. 1.

Видно, что максимум потока протонов, рис. 1а, совпадает с максимумом поглощения, рис. 1б. Это важно с точки зрения диагностики и прогноза изменений температуры атмосферы, поскольку данные поглощения можно получать оперативно, в отличие от данных потоков протонов. Видно, что подъем значений приземной температуры на ст. “Восток” начался на следующий день после ключевого дня и достиг своего максимума на второй день, рис. 1в. Средний подъем температуры с -69 до -65° соответствует среднему уровню риометрического поглощения 2 дБ.

Анализ влияния потоков протонов с энергиями $E > 60$ МэВ по 29-ти событиям 1978–1982 гг. на характеристики атмосферы в авроральной зоне проводился по данным ст. Диксон ($\varphi = 73.5^\circ$) в северном полушарии. Рассматривались данные для зимнего (13 событий) и летнего (16 событий) сезонов. Анализ показал, что дню максимума потока протонов, рис. 2а, соответствует относитель-

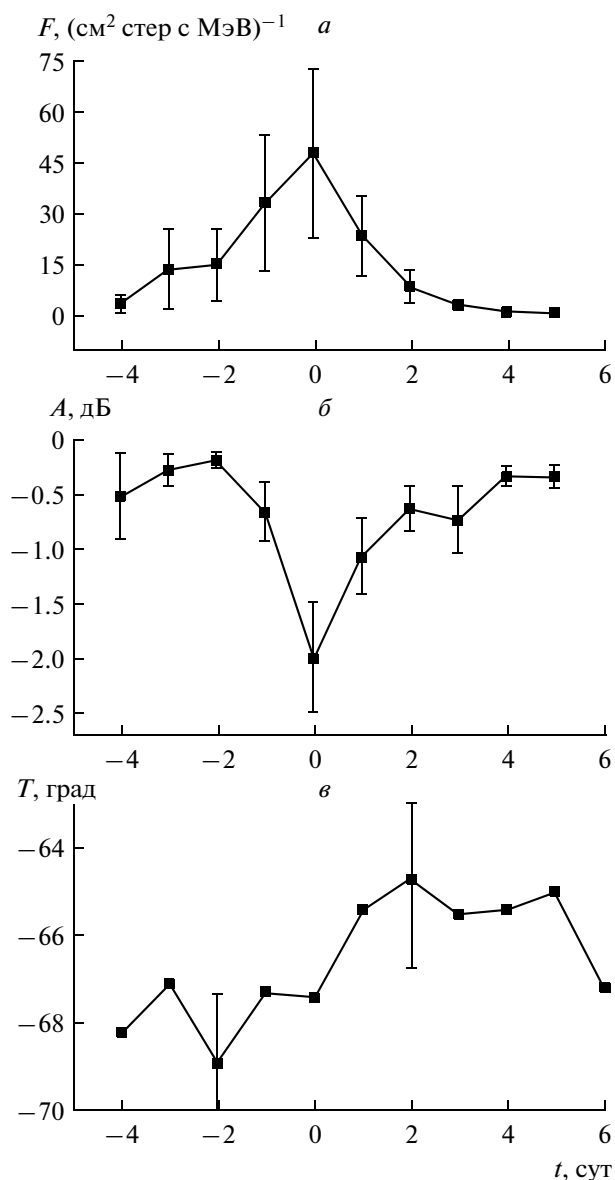


Рис. 1. Осредненный по 15-ти событиям ход вариаций уровня солнечных протонов — *a*; риометрического поглощения — *б*; приземной температуры на ст. “Восток” — *в* для зимнего сезона 1978–1979 гг.

ное увеличение температуры в зимний сезон, рис. 2*в*, слева. В летний сезон, наоборот, отмечается значительное, ~40%, похолодание в ключевой день, рис. 2*в*, справа. Был проведен также анализ хода среднесуточных значений магнитного *PC*-индекса для соответствующих 29-ти событий, рис. 2*б*. Он показал значительное увеличение *PC*-индекса в ключевой день, максимальное значение *PC* достигается через два дня после ключевого. *PC*-индекс хорошо коррелирует с B_z -компонентой межпланетного магнитного поля (ММП), поэтому можно говорить о влиянии солнечного ветра как дополнительного фактора на вариации температуры в высокоширотной атмосфере. Раз-

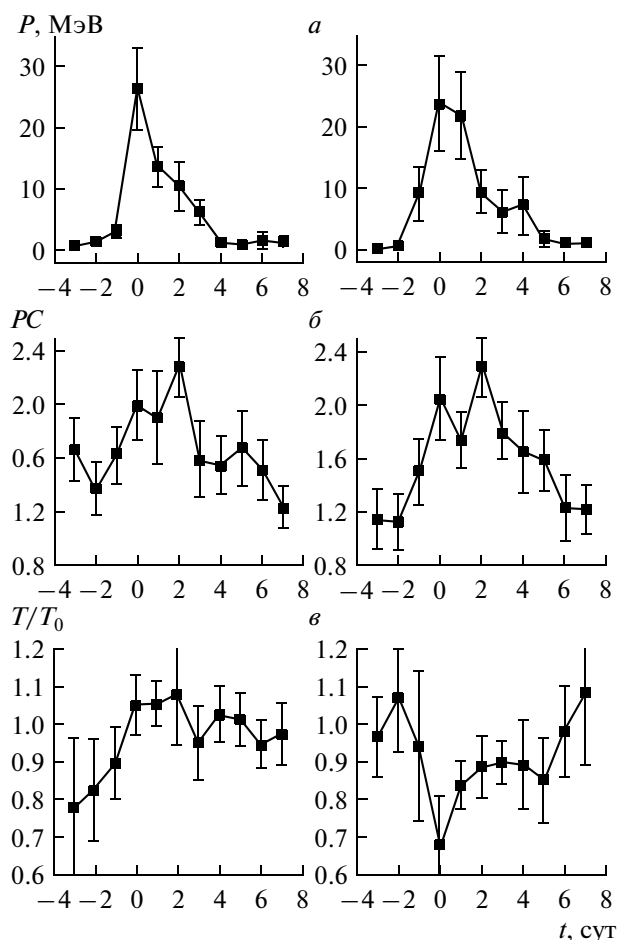


Рис. 2. Осредненный ход вариаций солнечных протонов с энергией $E > 60$ МэВ — *a*; *PC*-индекса — *б*; относительного изменения температуры на Диксоне — *в*; слева — для 13-ти событий зимнего сезона, справа — для 16-ти — летнего сезона 1978–1982 гг.

личие эффектов изменения температуры в летний и зимний сезоны служит подтверждением гипотез, предложенных в работах [Пудовкин и др., 1997; Tinsly and Deen, 1991] об изменении прозрачности атмосферы в периоды возмущений в ходе солнечно-космических процессов. В летний сезон уменьшение прозрачности в периоды внедрения СКЛ с энергиями в десятки и сотни МэВ ведет к похолоданию, так как в полярный день влияние круглосуточной солнечной радиации значительно уменьшается из-за отражения волновой радиации Солнца от облаков. В зимний период, в полярную ночь, при отсутствии волновой радиации Солнца дополнительная облачность ведет к повышению температуры за счет парникового эффекта.

3. СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ С ВАРИАЦИЯМИ ММП

Влияние космических факторов, таких как СКЛ и ГКЛ (галактические космические лучи),

на режим циркуляции в нижней атмосфере достаточно хорошо изучено в работах многих авторов [Пудовкин и Бабушкина, 1990; Вовк и др., 1997; Пудовкин и др., 1997; Веретененко и др., 2008; Ракипова и Вишнякова, 1984; Tinsly et al., 1989; Tinsly and Deen, 1991]. Высокая интенсивность СКЛ и ГКЛ характерна для лет высокой и средней СА, в годы минимума она практически не наблюдается. Вместе с тем, в высоких широтах часто происходят резкие изменения метеопараметров в периоды возмущений ММП, связанные с потоками плазмы солнечного ветра как в годы максимума, так и минимума СА. Связь ММП с метеопараметрами, возможно, объясняется влиянием потоков солнечной плазмы на электрические поля в атмосфере, а значит, и на облачность, которая вызывает усиление вариаций температуры и направления ветра [Troshitchev et al., 2008; Вовк и Егорова, 2009]. В работе [Вовк и Егорова, 2009] показано наличие отражающего облачного слоя на высоте $h \sim 8$ км в полярной шапке, полученное по данным аэрологических наблюдений во время сильных вариаций B_z -компоненты ММП. В качестве ключевого дня был взят день резкого увеличения амплитуды отрицательных значений B_z -компоненты ММП. Максимуму B_z соответствует максимум плотности потоков плазмы солнечного ветра, которая может влиять на электрический потенциал в полярной шапке за счет аномальной ионизации.

Для оценки влияния эффекта прозрачности на приземную температуру были взяты ежедневные данные метеорологических наблюдений в полярной шапке (ст. “Восток” и о-в Хейса, $\varphi = 80.6^\circ$) и в авроральной зоне (ст. Мурманск, $\varphi = 68.9^\circ$, и ст. Новолазаревская, $\varphi = -70.85^\circ$) с 1978 по 1980 гг. в периоды сильных возмущений ММП и связанных с ними магнитных бурь. Магнитные бури, во время которых наблюдаются сильные ионосферные возмущения, проявляют свое воздействие одновременно как в северном, так и в южном полушариях. Интересно сравнить вариации метеорологических характеристик полярных регионов северного и южного полушарий во время магнитных бурь.

Анализ вариаций приземной температуры проводился для 35-ти магнитных бурь, в том числе для 17-ти в зимний сезон лет максимума СА 1978–1980 гг. К бурям относились события, когда индекс $Dst < -50$. Сравнивался ход вариаций ежедневных данных приземной температуры в южном полушарии с магнитными PC -индексами [Troshitchev et al., 2006] для июня–августа зимнего сезона. Анализ проводился методом наложенных эпох, в качестве ключевого брался день начала бури. На рисунке 3 приведен усредненный по 15-ти событиям ход PC -индексов, температур на ст. “Восток” и ст. Новолазаревская. Видно, что рост температуры на ст. “Восток” соответствует

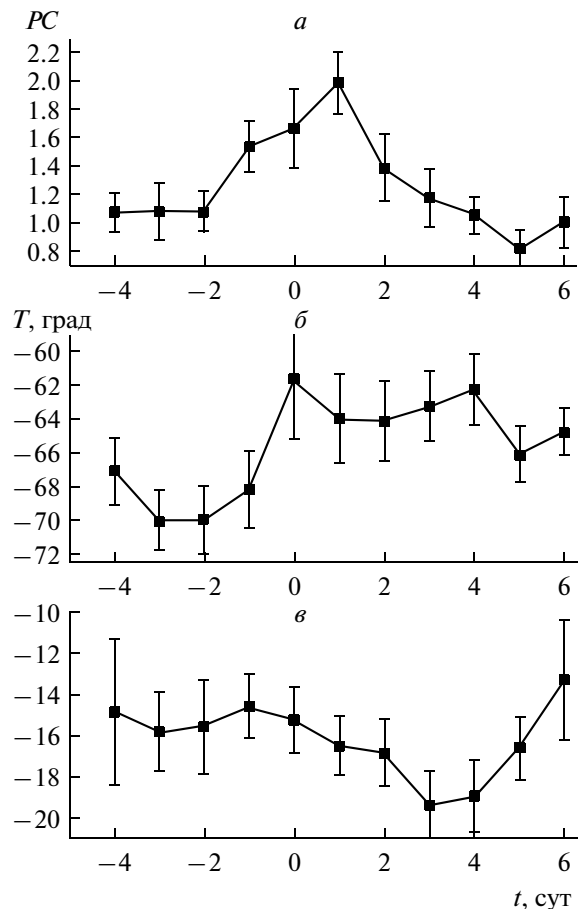


Рис. 3. Осредненный по 15-ти зимним событиям временной ход ежедневных значений PC -индекса – а; температуры на ст. “Восток” – б; на ст. Новолазаревская – в. Ключевой день – день, когда значения Dst -индекса становится меньше -50 .

росту PC -индекса, значение которого выросло с 1 до 1.6 в ключевой день. Максимум индекса $PC = 2$ наблюдается на следующий день после ключевого дня начала бури. Резкий перепад температур с -69 до -62° наблюдался в ключевой день. Повышенный температурный фон держался 5 дней. На ст. Новолазаревская произошло похолодание с -15° в день, предшествующий ключевому, до -19.5° на третий день после него.

Была также изучена зависимость вариаций температуры в периоды рассматриваемых бурь от характера изменчивости PC -индекса, рис. 4. Из 17-ти были взяты 5 случаев резкого роста PC -индекса, кривая 1, и 12 случаев более плавного роста PC , кривая 2, рис. 4б. Видно, что случаям резкого возрастания PC -индекса соответствует одномоментный рост температуры на ст. “Восток”, кривая 7, рис. 4а. Это можно интерпретировать как следствие внезапного роста плотности потока плазмы солнечного ветра, соответствующей быстрым изменениям электрического потенциала в по-

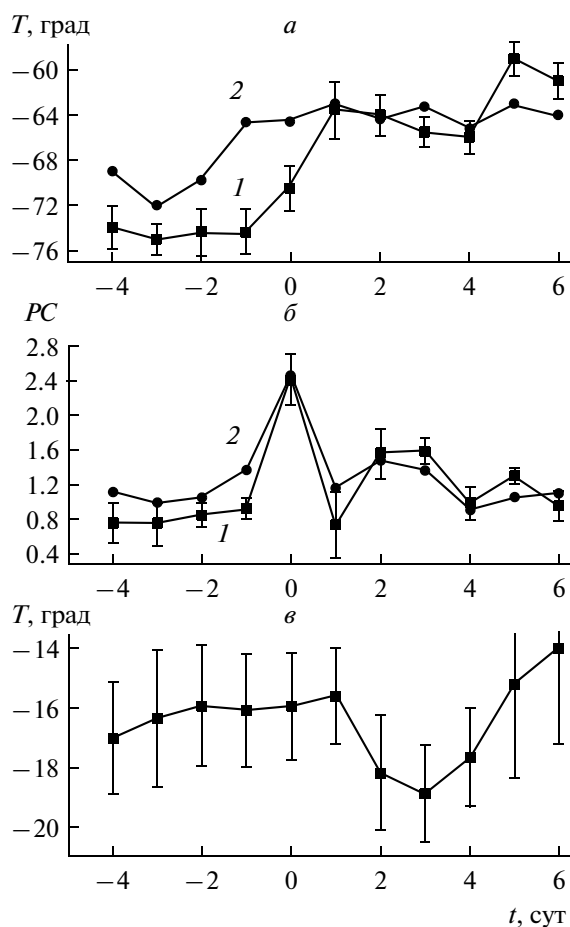


Рис. 4. Осредненный временной ход значений приземной температуры на ст. “Восток” — *a*, для случаев резкого роста *PC*, кривая — 1, для плавного — кривая — 2; соответствующий ход *PC*-индекса — *b*; ход температуры на ст. Новозазаревская для случаев резкого роста *PC* — *v*.

лярной шапке, и увеличения облачности, создавшей парниковый эффект. Плавному нарастанию *PC*-индекса, начавшемуся за два дня до ключевого, соответствует изменение температуры, представленное на рис. 4*a*, кривая 2, когда рост начинается в -2 -ой день, а максимум наблюдается в $+1$ -й. Это свидетельствует о том, что температура может реагировать не на максимум плотности потока плазмы, а на небольшой градиент, которому соответствует рост *PC*-индекса с 1 до 1.3 в -1 -й день. Изменение параметров потока плазмы солнечного ветра, связанное с вариациями уровня ММП, а значит и с величиной *PC*-индекса, может инициировать увеличение электрических полей в ионосфере и повлиять через изменение прозрачности атмосферы на приземную температуру. На ст. Новозазаревская при резком возрастании *PC*-индекса наблюдается резкое уменьшение температуры в $+1$ -й день, рис. 4*в*. Можно полагать, что вариации *PC*-индекса в диапазоне величин $PC = 1.3$ –

1.5 являются предвестником изменений характеристик нижней атмосферы в периоды геомагнитных возмущений, что важно для целей диагностики и прогнозирования.

В северном полушарии во время магнитных бурь также происходит усиление вариаций метеопараметров. Результат анализа влияния 17-ти магнитных бурь на приземную температуру арктического региона в зимний сезон (декабрь–февраль) 1978–1980 гг. представлен на рис. 5. Рисунок 5*a* демонстрирует усредненный ход *Dst*, рис. 5*б* — соответствующий ход *PC*, рисунки 5*в*, *г*, *д* — ход приземной температуры на о-ве Хейса, в Мурманске и в Петрозаводске, $\varphi = 61.5^\circ$.

На приполюсной ст. о-в Хейса наблюдалось уменьшение температуры на 3° за два дня до ключевого, когда $Dst < -50$. Похолодание длилось 6 дней. Возможно, начало похолодания связано с первым максимумом увеличения *PC*-индекса с 1 до 1.4, которое также наблюдалось за два дня до ключевого, рис. 5*б*. На авроральной ст. Мурманск также наблюдается значительное похолодание, которое начинается за 2 дня до ключевого — дня начала магнитной бури, рис. 5*г*. Вероятно, что это похолодание также связано с первым максимум в ходе *PC*-индекса. В связи с этим предположением важно оценить необходимый уровень амплитуды *PC*, при котором обнаруживаются значимые изменения в метеопараметрах нижней атмосферы. Похолодание в период магнитной бури захватывает большое пространство по широте, начиная от о-ва Хейса в приполюсной области до Петрозаводска в средних широтах, рис. 5*д*.

4. ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ В РАВНОДЕНСТВЕННЫЙ СЕЗОН ЛЕТА МАКСИМУМА SA

Оценим влияние геомагнитных возмущений на приземную температуру при высокой волновой солнечной радиации, т.е. для летнего сезона. Однако анализ вариаций температуры в полярном регионе летом, когда круглосуточно наблюдается полярный день, затруднителен, так как возможные изменения температуры, связанные с геомагнитной активностью, трудно выделить на фоне изменений, вызванных солнечной радиацией.

В равноденственный сезон освещенность южных и северных полярных регионов практически одинакова, поэтому можно анализировать воздействие геомагнитных возмущений на метеохарактеристики в северном и южном полушариях по одним и тем же событиям.

Были взяты 25 событий резкого увеличения амплитуды *PC*-индекса до величины больше двух в равноденственный сезон март–май, сентябрь–

октябрь 1978–1979 гг., а также соответствующие данные вариаций приземных температур на полярных станциях Новолазаревская и Мурманск. На рисунке 6 приведен ход *PC*-индекса, приземных температур на вышеупомянутых станциях и кривые регрессионной зависимости между ними. Видно, что характер вариаций температур имеет значительное сходство. В Мурманске относительные температуры имеют минимум на 3-й день после ключевого, рис. 6б. Минимальная температура на ст. Новолазаревская, рис. 6в, наблюдается через два дня после ключевого дня – дня максимума *PC*-индекса. Степень схожести хода приземной температуры на этих станциях была проверена с помощью метода корреляционного анализа. Значимый коэффициент корреляции между одномоментными значениями температур в Новолазаревской и Мурманске составляет величину $r = 0.59$, рис. 6г. Если взять данные температур в Мурманске с запаздыванием на одни сутки относительно Новолазаревской, то величина коэффициента корреляции повышается до $r = 0.73$, рис. 6д. Это показывает наличие симметрии в процессах воздействия солнечно-космических факторов на характеристики атмосферы северной и южной приполярных областей во временном интервале нескольких суток.

Была также проведена оценка связи солнечно-космических факторов с более длительными процессами в атмосфере северного и южного полярных регионов, а именно: оценивалась степень их влияния на северную и южную атмосферные осцилляции. Рассмотрены ежемесячные значения индексов SOI, соответствующие значения индекса Nino-3.4, а также индексов NAO и ежемесячные значения магнитных *Ap*-индексов. Перед началом теплого течения Эль-Ниньо более 5-ти месяцев наблюдаются увеличенные значения амплитуды магнитных *Ap*-индексов [Вовк и Егорова, 2009]. Начало холодного периода SOI Ла-Нина связано, как правило, с уменьшением величины *Ap*. На рисунке 7 приведены ход усредненных ежемесячных индексов *Ap* – рис. 7а; соответствующие им среднемесячные значения SOI – рис. 7б; коэффициента Nino-3.4 – рис. 7в и среднемесячных индексов NAO – 7г. Левый столбец – для 24-х событий Эль-Ниньо, правый – для 24-х событий Ла-Нина, выбранных за период с 1938 по 2002 гг. Как видим, индекс магнитной активности *Ap* начинает расти за три месяца до начала теплых событий Эль-Ниньо, достигает максимума в +3-й месяц и сохраняется несколько месяцев на высоком уровне. Этому росту соответствует длительный, по крайней мере, шестимесячный период низкого уровня (~ -1.5) индекса SOI, характеризующего разность нормализованного атмосферного давления между ст. Дарвин (Австралия) и о-вом Таити в Тихом океане. В это же время наблюдается увеличение коэффициента Nino-3.4, ха-

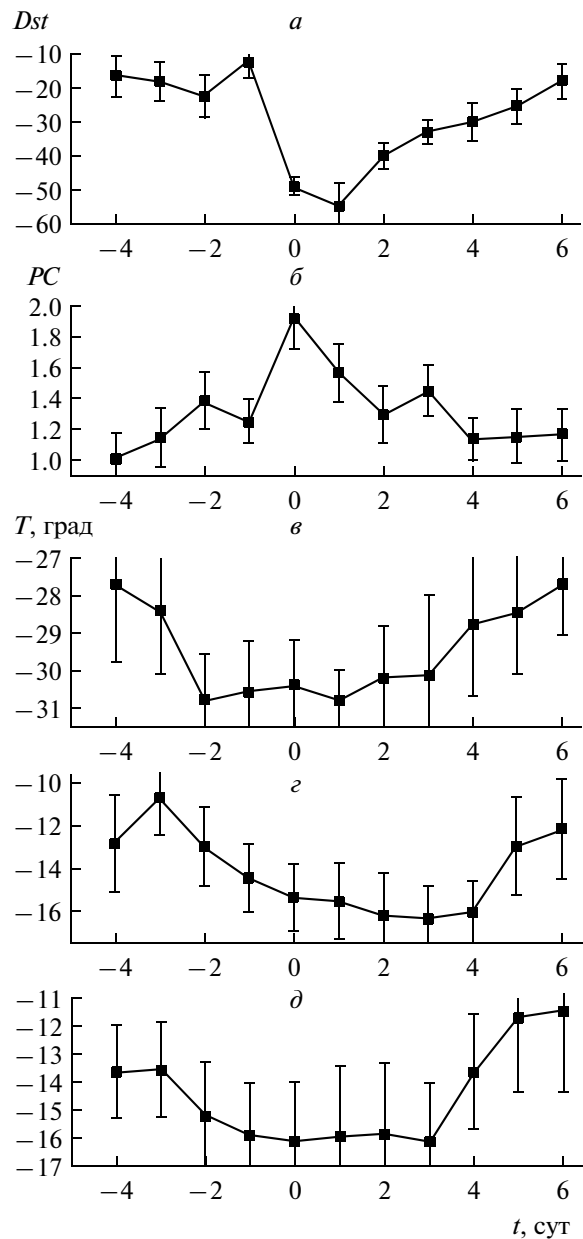


Рис. 5. Вариации усредненного по 17-ти событиям хода *Dst*-индекса – а; *PC*-индекса – б; температуры на о-ве Хейса – в, в Мурманске – г, Петрозаводске – д.

рактически характеризующего потепление воды в южной части Тихого океана с нуля в –4-й месяц до 1.2 в +6-й. Также интересным фактом является увеличение индекса NAO, характеризующего разность нормализованного атмосферного давления между ст. Понта-Дельгадо (Азорские острова) и Рейкьявиком (Исландия) в Атлантике, с величины; –0.5 за два месяца до ключевого до +0.5 в ключевой. Максимум наблюдается в –1-й месяц.

После ключевого месяца происходит падение NAO до исходного уровня. Уменьшению магнитного индекса *Ap* с 15 в –1-й месяц до 11 – в +3-й

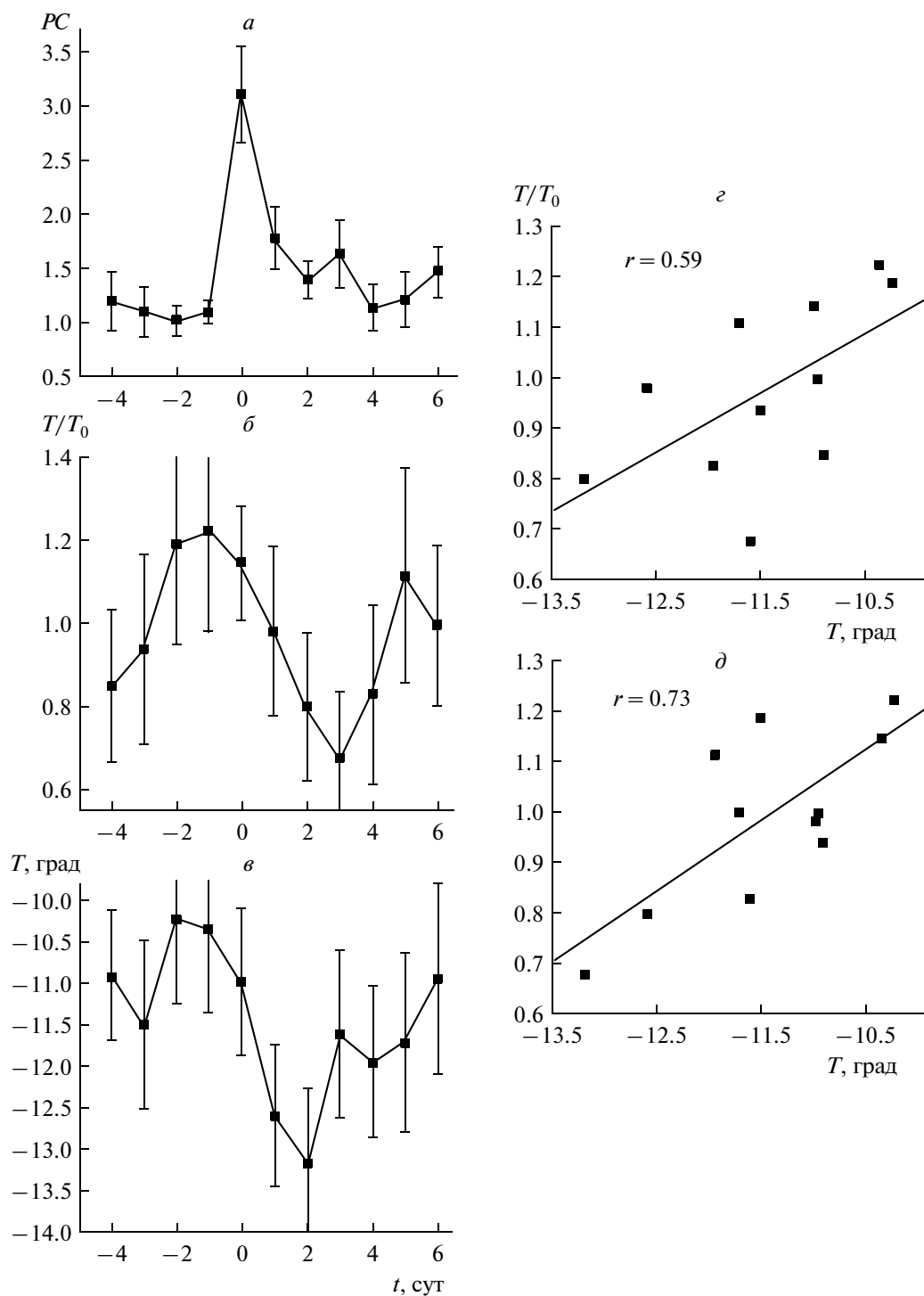


Рис. 6. Осредненный по 25-ти событиям временной ход PC -индекса — a ; ход нормированной температуры в Мурманске — $б$; температуры на ст. Новозаревская — $в$; регрессионные соотношения между ними в возмущенные геомагнитные периоды равноденственного сезона 1978–1979 гг. для одномоментных данных — $з$, при запаздывании данных ст. Новозаревская на 1 сут — $д$.

соответствует рост положительных значений SOI. В то же время происходит увеличение амплитуды отрицательных значений Nino-3.4, связанное с похолоданием воды, с -0.3 до -0.7 . В этот холод-

ный период происходит уменьшение индекса NAO с $+0.6$ в -2 -й месяц до -0.4 — в ключевой. Таким образом, в холодный период Ла-Нина индекс NAO ведет себя противоположным образом

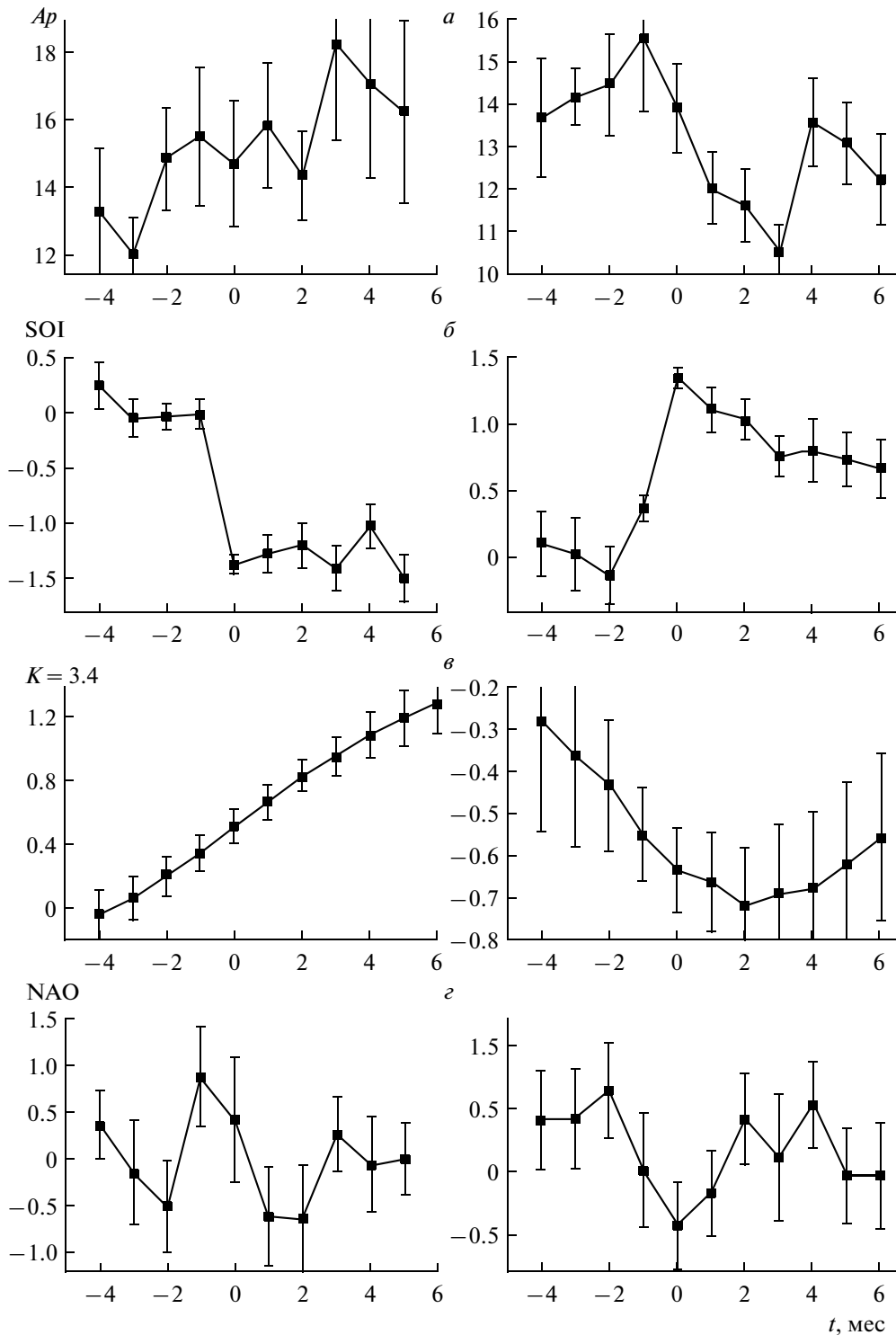


Рис. 7. Осредненный временной ход Ap -индексов — a ; индексов SOI — $б$; Nino-3.4 — $в$; NAO — $г$ для 15-ти событий теплого течения Эль-Ниньо (левый столбец), для 18-ти событий холодного течения Ла-Нина — (правый). Ключевой месяц — месяц резкого начала аномальных периодов Эль-Ниньо и Ла-Нина.

по сравнению с теплым периодом Эль-Ниньо. При этом оба явления связаны с вариациями Ap -индекса, Глобальные изменения характеристик атмосферы северного и южного полушарий свя-

заны с солнечно-космическими факторами, в том числе и с воздействием потоков плазмы солнечного ветра, который является причиной вариаций уровня магнитных индексов. Таким образом, ана-

лиз вариаций магнитных индексов может служить целям диагностики погодных и климатических факторов.

Показанная связь магнитных *Ap*-индексов с вариациями индексов SOI позволяет предположить, что вариации *PC*-индекса также могут предшествовать изменениям SOL. Анализ хода усредненных ежемесячных индексов *PC* показал соответствующее им резкое уменьшение индексов SOI для 10-ти мощных событий Эль-Ниньо с 1982 по 2006 гг. Максимум *PC* = 3.3 предшествует началу Эль-Ниньо на один месяц. Можно полагать, что использование *PC*-индекса, регистрируемого в реальном времени, является перспективным для диагностики погодно-климатических вариаций в периоды солнечных вспышек и геомагнитных возмущений.

5. ВЫВОДЫ

В годы максимума СА 1978–1982 гг. в зимний сезон среднее максимальное увеличение приземной температуры на 2 градуса наблюдается в полярной шапке на ст. “Восток” на 2-й день после максимума риометрического поглощения космического шума. В авроральной зоне на ст. Диксон максимуму потока протонов, ответственных за риометрическое поглощение, соответствует одномоментный относительный рост температуры на 20%. В летний сезон, наоборот, происходит уменьшение температуры на 40%.

Важным фактором, влияющим на характеристики нижней атмосферы, являются потоки плазмы возмущенного солнечного ветра и связанные с ними вариации ММП, которые вызывают геомагнитные возмущения и возникновение электрических полей в атмосфере. По нашим данным эффекты воздействия геомагнитных возмущений на параметры нижней атмосферы более значимы, чем СКЛ, влияние которых в годы низкой СА незначительно.

Рост температуры на 8° в полярной шапке на ст. “Восток” в зимний период связан с ростом *PC*-индекса с 1 до 2. В авроральной зоне (ст. Новолазаревская) зимой наблюдается обратный эффект — уменьшение температуры на 5° на 3-й день после максимума *PC*-индекса.

В северном полушарии на широтах 62–80° в зимний сезон в периоды сильных магнитных бурь (*Dst* < –50) наблюдается похолодание на 3–5° в зависимости от широты, что соответствует росту *PC*-индекса, в среднем с 1 до 1.4.

В равноденственный сезон в авроральной зоне северного и южного полушарий вариации приземных температур имеют значительное сходство. В периоды роста *PC*-индекса с 1 до 3 коэффициент корреляции между значениями темпе-

ратур на Новолазаревской и в Мурманске имеет значимую величину $r = 0.73$.

Наблюдается симметрия реакции северной и южной атмосферных осцилляции на вариации геомагнитного *Ap*-индекса. Росту *Ap*-индекса соответствуют падение индекса SOI с 0 до –1.5 (эффект Эль-Ниньо) и рост индекса NAO северной осцилляции с –0.6 до +0.8. Уменьшение *Ap*-индекса вызывает реакцию противоположного характера как для индексов SOI, так и NAO.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веретененко С.В., Ивлев Л.С., Ульев В.А. Исследование вариаций стратосферного аэрозоля во время солнечных протонных событий января 2005 г. по данным GOMOS/ENVISAT // Проблемы Арктики и Антарктики. № 3 (80). С. 126–130. 2008.
- Вовк В.Я., Егорова Л.В., Москвин И.В. Эффекты вариаций космического излучения в характеристиках атмосферного давления в районе южного геомагнитного полюса // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 3. С. 163–167. 1997.
- Вовк В.Я., Егорова Л.В. Влияние геомагнитной и вулканической активности на явления Эль-Ниньо и Ла-Нина // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 2. С. 278–288. 2009.
- Пудовкин М.И., Бабушкина С.В. Эффекты солнечных вспышек в вариациях атмосферного давления на уровне земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 30. № 3. С. 469–473. 1990.
- Пудовкин М.И., Виноградова Н.Я., Веретененко С.В. Вариации атмосферной прозрачности во время солнечных протонных событий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 2. С. 124–126. 1997.
- Ракипова Л.Р., Вишнякова О.Н. Влияние солнечной вспышки на концентрацию озона // Тр. ГГО. Л.: Гидрометеоиздат. Вып. 471. С. 9–14. 1984.
- Tinsly B.A., Brown G.M., Scherer P.H. Solar variability influences on weather and climate: possible connection through cosmic ray fluxes and storm intensification // J. Geophys. Res. V. 94. P. 14783–14792. 1989.
- Tinsly B.A., Deen C.W. Apparent tropospheric response to MeV–GeV particle flux variations; a connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds // J. Geophys. Res. V. 96. P. 22283–22296. 1991.
- Troshichev O.A., Egorova L.V., Vovk V.Ya. Evidence for influence of the solar wind variations on atmospheric temperature in the southern polar region // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 65. P. 947–956. 2003.
- Troshichev O., Jandzhura 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. V. 111. A05 2008. doi: 10.1029/2005JA011402. 2006.
- Troshichev O., Vovk V., Egorova L.V. IMF-associated cloudiness above near-pole station Vostok: Impact on wind regime in winter Antarctica // J. Atm. Solar-Terr. Phys. V. 70. P. 1289–1300/2008.