

УДК 550.385.37

РЕАКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ НА ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ 5 АПРЕЛЯ 2010 г.

© 2014 г. С. Э. Смирнов

Представлено академиком Л.М. Зеленым 17.12.2012 г.

Поступило 11.02.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565214150183

В сообщении представлен наиболее полный набор реакций электрических полей приземной атмосферы на магнитную бурю на среднеширотной обсерватории. Наблюдение целого набора эффектов вызвано как условиями проведения измерений, так и особенностями развития самой бури. Показано проявление трех процессов в развитии этой бури. Падение электропроводности воздуха связано с уменьшением потока галактических космических лучей (ГКЛ), одного из основных ионизаторов воздуха. Внезапное начало бури вызвало индукционные эффекты в электрических полях. На последующих стадиях бури появился значительный избыток положительно заряженных частиц в приземном воздухе.

Исследованию эффектов солнечной активности и связанных с ней геомагнитных бурь в атмосферном электричестве высоких и средних широт посвящена довольно обширная литература (см., например, [1]). К сожалению, эти результаты очень ограничены и довольно противоречивы. Последнее обстоятельство может быть связано не только с особенностями физических процессов в приземной атмосфере для индивидуальных геомагнитных бурь, но и с выбором, например, места регистрации, а также с состоянием атмосферы до и во время бури и т.д.

В работе [2] обнаружена положительная корреляция между электрическим потенциалом нижней ионосферы и интенсивностью ГКЛ. В других экспериментах, выполненных в горной местности, обнаружена отрицательная корреляция этих параметров [3]. В наблюдениях на равнинах также получены противоречивые результаты. В серии работ коллектива В.М. Шефтеля [4–6] показано

увеличение напряженности поля относительно фонового уровня за пять–шесть часов до начала понижения ГКЛ. И эта фаза положительного возмущения поля продолжалась до момента максимальной глубины форбуш-эффекта, а затем наступала более продолжительная отрицательная фаза возмущения поля. Подобный результат получен в работе [7]: в день максимальной глубины форбуш-эффекта во время сильных геомагнитных бурь наблюдалась положительная фаза возмущения напряженности электрического поля ~2%. Далее наступала продолжительная отрицательная фаза с постепенным восстановлением напряженности электрического поля в течение десяти дней. Во время сильных геомагнитных бурь, включающих бурю 30 октября 2003 г. [8, 9], на ст. “Свидер” были зарегистрированы отрицательные бухты градиента потенциала электрического поля. Совпадение по времени их длительностей с длительностью всплесков риометрического поглощения в субавроральной зоне позволило авторам предположить, что “причиной появления отрицательных значений градиента потенциала электрического поля может быть возрастание проводимости верхней атмосферы, вызванное вторжением энергичных электронов в субавроральные широты” [8, с. 152].

Не менее противоречивы предлагаемые возможные механизмы этих эффектов. В работах [2, 10] содержится гипотеза влияния солнечной активности на атмосферное электричество. Суть ее сводится к тому, что под действием космических лучей (одного из главных ионизаторов атмосферы) изменяется проводимость глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Последняя представляет собой замкнутую токовую систему, главным генератором в которой, согласно модели сферического конденсатора, являются тропические грозы. Токи этого генератора через сопротивление воздуха выше него текут в нижнюю ионосферу и замыкаются через невозмущенную удален-

*Институт космофизических исследований
и распространения радиоволн
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук,
с. Паратунка Камчатского края*

ную атмосферу и поверхность Земли. Эти токи обеспечивают заряд сферического конденсатора Земля–ионосфера. В нижней части этой цепи на высотах до ~2 км основным ионизатором атмосферы является естественная радиоактивность почвы, а на высотах ~15–20 км – ГКЛ. Проникая в нижнюю стратосферу и верхнюю тропосферу, они способны вызвать ионизацию, которая ведет к усилению токов ГЭЦ. Именно поэтому для изучения влияния солнечной и геомагнитной активностей стали использовать одновременные наблюдения параметров атмосферного электричества и ГКЛ либо в горах, либо на изолированных островах с использованием аппаратуры на самолетах или баллонах, т.е. выше обменного слоя атмосферы. В этом слое существенное влияние на вариации напряженности электрического поля оказывают локальные конвективные и турбулентные процессы.

В серии работ Шефтеля опережение положительной фазы напряженности электрического поля относительно начала форбуш-эффекта на высокоширотных станциях авторы связали с действием солнечных протонов, а сам эффект положительной фазы возмущения поля в стадии углубления – с воздействием на атмосферу жесткой мюонной компоненты ГКЛ, которая достигает уровня моря и определяет их вклад в проводимость атмосферы в месте регистрации электрического поля. На ст. “Борок” в главную фазу бури 28–31 марта 2000 г. наблюдалась положительная бухта напряженности электрического поля. В качестве механизма эффекта автор предполагает “проникновение полей магнитосферно-ионосферного источника в нижнюю атмосферу средних широт” [11].

Наблюдения геофизических полей во время магнитной бури 5 апреля 2010 г. проводили на Камчатке в обсерватории “Паратунка” ИКИР ДВО РАН ($\varphi = 52.9^\circ$ с.ш.; $\lambda = 158.25^\circ$ в.д.). Напряженность электрического поля измеряли датчиком “Поле-2”, разработанным в филиале Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова [12]. Датчик “Поле-2” установлен на полигоне в 200 м от административного здания на высоте 3 м, площадка вокруг него расчищена от деревьев в радиусе 12 м. Сигнал на выходе этого флюксметра после оцифровки 14-битным АЦП с частотой дискретизации 1 с записывается на жесткий диск персонального компьютера.

Одновременно измерялась электропроводность воздуха прибором “Электропроводность-2”, разработанным также в филиале Главной геофизической обсерватории. Он имеет два воздухозаборника, расположенных на высоте 3 м, для измерений электропроводности, вызванной отдельно положительными и отдельно отрицательными ионами воздуха.

Напряженность поля измеряется по двум каналам. Первый канал имеет разрешение 0.25 В/м и динамический диапазон ± 200 В/м. Второй канал имеет разрешение 2.5 В/м и динамический диапазон ± 2000 В/м. При обработке измерений учитывали показания обоих каналов. Методика проведения измерений соответствует руководящему документу Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова [13].

Метеорологические параметры контролируются цифровыми метеостанциями WS-2000 и WS-2300. Данные поступают на станцию по радиоканалу на частоте 433 МГц. Частота опроса метеоданных составляет 10 мин^{-1} . Контролируемые метеоданные: сила ветра, направление ветра, атмосферное давление, температура воздуха, влажность воздуха, осадки (в летний период).

Вариации геомагнитного поля измеряли феррозондовым магнитометром FRG-601G с частотой дискретизации 1 с и погрешностью 0.01 нТл.

Минимум 23-го цикла солнечной активности был достигнут в декабре 2008 г. Период 2006–2010 гг. характеризуется малым числом магнитных бурь. 3 апреля 2010 г. на Солнце произошла рентгеновская вспышка класса В7.4, которая привела к выбросу коронального волокна. По интенсивности она была небольшой, но весьма продолжительной (более 7 ч). 5 апреля 2010 г. в 8:27 UT было зафиксировано внезапное начало магнитной бури. На рис. 1а представлен график H -компоненты геомагнитного поля за 5–6 апреля. Кр-индекс этой бури равнялся 7. Предыдущая буря такого класса была 11 октября 2008 г., т.е. это была самая сильная буря за предыдущие полтора года.

Воздействие магнитной бури на электрическое состояние приземного воздуха можно разделить на три этапа. Фоновый уровень электрического поля до начала бури был около 25 В/м (рис. 1б). Первый этап с 4:25 до 8:27 UT характеризуется повышением уровня электрического поля до 50 В/м. Причиной такого повышения могло быть резкое уменьшение уровня проникновения ГКЛ до поверхности земли. В пользу такой интерпретации свидетельствуют два фактора. Во-первых, плотность тока проводимости в этот период не претерпела существенных изменений. Эта величина была получена косвенным методом из вычисления $j = Ez(\lambda_+ + \lambda_-)$, где Ez – напряженность электрического поля, λ_+ и λ_- – электропроводность воздуха, вызванная соответственно положительными и отрицательными ионами. Во-вторых, электропроводность воздуха резко уменьшается в этот период (рис. 2а). Галактические космические лучи наряду с радоном являются одним из ионизаторов воздуха. Уменьшение ионизирующего воздействия ГКЛ приводит к уменьшению элек-

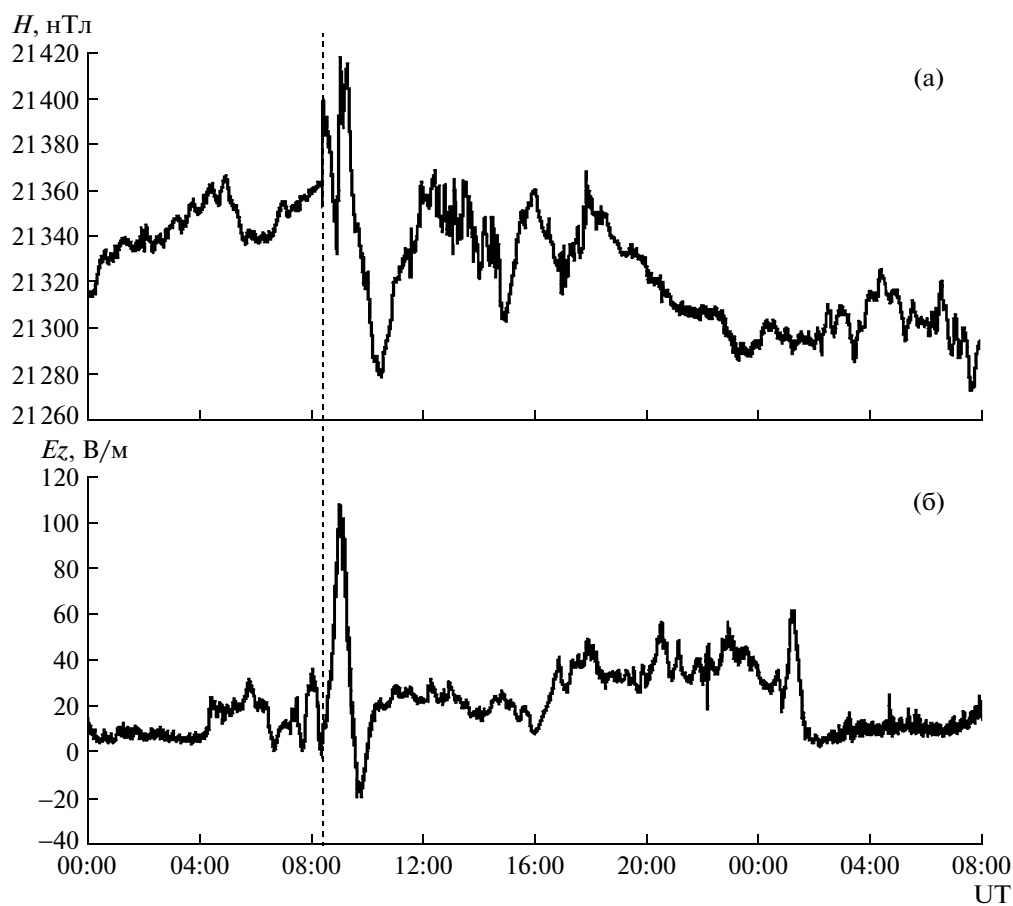


Рис. 1. Развитие магнитной бури (начало — штриховая линия) 5–6 апреля 2010 г. H -компонента магнитного поля (а) и градиент потенциала электрического поля (б).

тропроводности (рис. 2а) и, соответственно, к увеличению Ez (рис. 1б).

На втором этапе в интервале с примерно 8:27 до 12:00 UT происходит резкое возрастание электрического поля, а затем его понижение. Это совпадает по времени с резкими осцилляциями H -компоненты геомагнитного поля. Аналогично вела себя плотность тока. Такие возмущения имеют, возможно, индукционную природу. На рис. 1а построен график H -компоненты геомагнитного поля, а на рис. 1б — градиент потенциала электрического поля. На этих рисунках видно, что начало бури с внезапным вступлением сильно изменяет токовую систему в приземном слое воздуха. Однако на последующих этапах влияние магнитного возмущения на токовую систему выражено слабо.

На третьем этапе с примерно 12:00 5 апреля до 01:30 UT 6 апреля происходит возрастание электрического поля, связанного с увеличением коэффициента униполярности (рис. 2б). Коэффициент униполярности $K = \frac{\lambda_+}{\lambda_-}$ показывает отношение концентрации положительных ионов к концентрации отрицательных. Плотность тока

проводимости в это время превысила уровень, который был на втором этапе.

Вопросу влияния магнитных бурь на электрическое состояние приземного воздуха посвящено много работ. К сожалению, результаты этих наблюдений оказываются противоречивыми. Это может быть связано не только с особенностями физических процессов в приземной атмосфере для индивидуальных магнитных бурь, но и с выбором места регистрации полей. Не менее противоречивы предлагаемые возможные механизмы этих эффектов. Во введении уже указывалась гипотеза о механизме связи ГКЛ и ГЭЦ [2, 10]. В работах [4–6] авторы связали повышение уровня значений градиента электрического поля на начальной стадии, опережающей начало форбуш-эффекта, с действием солнечных протонов. На последующих стадиях повышение уровня поля они связали с воздействием на атмосферу жесткой мюонной компоненты ГКЛ. В работе [7] предполагается изменение проводимости ГЭЦ под воздействием ГКЛ.

Среди особенностей бури 5 апреля 2010 г. и сопровождающих ее явлений можно отметить следу-

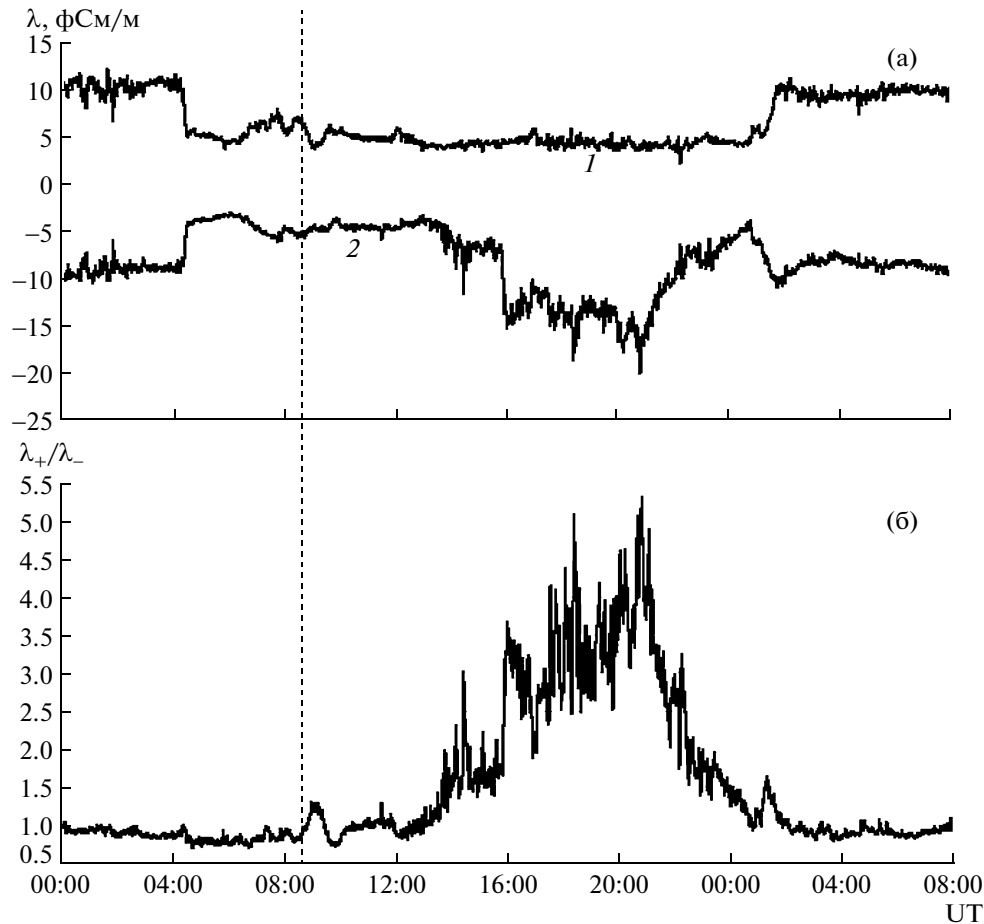


Рис. 2. Развитие магнитной бури (начало – штриховая линия) 5–6 апреля 2010 г. а – электропроводность воздуха, вызванная отрицательными (1) и положительными с множителем –1 ионами (2), *H*-компонента магнитного поля;

б – униполярность $\left(\frac{\lambda_+}{\lambda_-}\right)$ воздуха.

ющие: буря была с внезапным началом и большим скачком величины поля; в период начала бури работал ионосферный нагревательный стенд на Аляске; началась активная фаза извержения вулкана Эйяфьятлайокудль в Исландии. Последние два явления было бы интересно рассмотреть в контексте совместных геофизических проявлений.

В развитии этой бури можно проследить три эффекта, наблюдаемых в обс. Паратунка. Первый связан с уменьшением электропроводности воздуха (рис. 2а). Такое уменьшение могло быть обусловлено “выключением” одного из ионизаторов молекул воздуха. Ионизаторами на этом уровне являются радон и ГКЛ. Сейсмическая обстановка в это время была спокойной, а значит, не было значительных деформационных процессов, которые привели бы к резкому увеличению эманации радона. Следовательно, уменьшение электропроводности можно связать с уменьшением потока ГКЛ.

Второй эффект проявился в резких изменениях тока на начальных стадиях бури. По-видимому, он связан с индукционными явлениями электромагнитных процессов.

Третий эффект показал положительное бухтообразное изменение коэффициента униполярности, связанной с преобладанием концентрации положительных ионов. Такой избыток мог быть вызван их приходом из космического пространства либо очень сильным снегопадом в районе наблюдений. Поскольку осадкомер не зафиксировал каких-либо осадков, то, возможно, осадки в виде мелких снежинок были весьма слабы, и имело место наложение вместе этих двух явлений.

Таким образом, воздействие магнитной бури на электрическое состояние приземного слоя воздуха проявляется в трех эффектах:

1. Резкое падение потока ГКЛ, вызванное солнечным ветром. Эффект привел к увеличению уровня электрического поля с 25 до 50 В/м. Он

начался за 4 ч до внезапного начала магнитной бури и продлился около 20 ч.

2. Наблюдались большие осцилляции тока проводимости, совпадающие с началом магнитной бури. Такие возмущения, возможно, вызваны индукционными процессами. Длительность этого процесса была около 2 ч.

3. Увеличение коэффициента униполярности ионов в атмосфере было вызвано избытком положительно заряженных частиц. Эффект произошел через 8 ч после начала магнитной бури и длился около 13 ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апсен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышева С.П. и др.* Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве. М.: Наука, 1988. 150 с.
2. *Markson R.* // Nature. 1981. V. 291. P. 304–308.
3. *Кречетов А.А., Филиппов А.Х.* В кн.: Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ РАН, 2010. С. 30–32.
4. *Шефтель В.М., Чернышов А.К.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31. № 3. С. 500–505.
5. *Шефтель В.М., Чернышев А.К.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 1. С. 111–117.
6. *Шефтель В.М., Бандилет О.М., Чернышев А.К.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 1. С. 186–188.
7. *Marcz F.* // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59. № 9. P. 975–982.
8. *Никифорова Н.Н., Клеймёнова Н.Г., Козырева О.В. и др.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45. № 1. С. 148–152.
9. *Клеймёнова Н.Г., Козырева О.В., Михновски С., Кубицки М.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 5. С. 650–659.
10. *Марксон Р.* В кн.: Солнечно-земные связи, погода и климат. М.: Мир, 1982. С. 242–264.
11. *Анисимов С.В.* В сб.: VI Рос. конф. по атмосферному электричеству 1–7 октября 2007 г., Н. Новгород. Н. Новгород, 2007. С. 7–10.
12. *Имянитов И.М.* Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М.: Гостехиздат, 1957. 483 с.
13. РД 52.04.168-2001. Методические указания. Наблюдения за электрическим полем. СПб: Гидрометеорологическое издательство, 2002. С. 23.