УДК 550.388.2

## ЭФФЕКТ ЗАХВАТА ЗОНДИРУЮЩИХ РАДИОВОЛН В ИСКУССТВЕННЫЙ КРУПНОМАСШТАБНЫЙ ИОНОСФЕРНЫЙ РЕЗОНАТОР

И.В. Крашенинников, Ю.Н. Черкашин

Поступила в редакцию 08 сентября 2015 г.

Представлены результаты феноменологического анализа данных наклонного ЛЧМ-радиозондирования ионосферы в нагревном эксперименте 2007 г. с возможной регистрацией эффекта захвата в искусственный ионосферный резонатор и высвечивания зондирующего излучения в ближнюю зону стенда «Сура». Обсуждаются физические аспекты формирования дополнительного следа на диагностических ионограммах наклонного радиозондирования возмущенной области ионосферы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МНОГОЧАСТОТНОЕ НАКЛОННОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ, РАКУРСНОЕ РАССЕЯНИЕ, ИСКУССТВЕННОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ ИОНОСФЕРЫ, МОЩНОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ.

## введение

Нелинейное взаимодействие мощных радиоволн с ионосферной плазмой при вертикальном излучении носит резонансный характер и приводит к искусственному возмущению ионосферы, сопровождающемуся стимулированным развитием неоднородностей электронной плотности различных масштабов вплоть до размеров, определяемых угловой шириной диаграммы направленности антенной системы нагревной установки [1, 2]. Основные радиофизические проявления воздействия искусственно возмущенной области (ВО) на зондирующие радиоволны сводятся к двум эффектам: рассеянию на мелкомасштабных неоднородностях и дополнительной рефракции на крупномасштабной структуре возмущения. При отражении мощной волны накачки на высотах вблизи максимума слоя F2 ионосферы образуется крупномасштабная область с пониженной относительно фона электронной плотностью, степень возмущения в которой растет с высотой [2]. В результате, в условиях высотной неоднородности электронной концентрации, может образоваться открытый снизу искусственный резонатор с высоким градиентом показателя преломления на границе. Экспериментальное подтверждение радиофизического проявления крупномасштабной отрицательной неоднородности, по-видимому, впервые было получено в 1980-х годах в экспериментах по наклонному радиозондированию возмущенной области (стенд «Сура»), в которых был зафиксирован рост максимально применимой частоты (МПЧ 1F2) ионограмм НЗ на фоне естественного вечернего спада в периоды работы нагревного стенда. Этот эффект был интерпретирован как проявление рефракционных свойств крупномасштабной отрицательной неоднородности, в частности, обусловленных наличием повышенного градиента электронной плотности в ее верхней части [3, 4].

В работе [5] рассматривалась задача о возможности захвата зондирующего излучения в полость электронной плотности на сильном градиенте показателя преломления в нижней части ВО (относительное возмущение  $\Delta N_e/N_e \sim 40\%$ ). Было показано, что эффект может быть обнаружен на диагностической радиотрассе с небольшим расстоянием между терминальными точками (~ 300 км) и с симметричным расположением локализованной неоднородности. Радиотомографическое просвечивание нагревной области [2] показало, что могут образовываться, преимущественно в вечерне-ночное время, крупномасштабные отрицательные возмущения с масштабом ~ 100 км и с относительным соотношением  $\Delta N_e/N_e \sim 30\%$ . Т. е., в принципе, могут реализоваться условия для возможного захвата зондирующих волн в крупномасштабную полость электронной плотности.

В данной работе представлены результаты феноменологического анализа данных наклонного ЛЧМ-радиозондирования локально возмущенной ионосферы в диагностическом эксперименте 2007 г., с возможной регистрацией эффекта захвата в искусственный ионосферный резонатор и последующего высвечивания зондирующего излучения в ближнюю зону нагревного стенда «Сура».

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В настоящее время сложилось общепринятое понимание, что под действием мощного радиоизлучения в слое F2 ионосферы может образоваться крупномасштабная область с пониженной относительно фонового содержания электронной плотностью [2], заполненная мелкомасштабными, вытянутыми по геомагнитному полю, возмущениями (турбулентностью) [1]. Следствием мелкомасштабной структуры возмущенной области будет рассеяние проходящих радиоволн, резонансное как по длине волны, так и по пространственной локализации — ракурсное рассеяние [1]. Для ракурсного рассеяния характерно формирование конуса проявления — для точек излучения и приема должен выполняться критерий близости или дополнительности углов, образуемых волновыми векторами и вектором геомагнитного поля в центре возмущенной области — задача рассеяния на вытянутых телах. Следы ракурсного рассеяния на ионограммах НЗ ионосферы могут иметь кластерную структуру, т. е. в частотной области могут существовать несколько отдельных групп, различающихся как интенсивностью, групповым запаздыванием, так и частотной областью существования. Физической причиной является сложный характер взаимодействия процессов рассеяния на неоднородностях возмущенной области и рефракции зондирующих волн в фоновой неоднородной ионосфере [6].

С учетом основных процессов взаимодействия мощного волнового поля с ионосферной плазмой, локализованное крупномасштабное возмущение для высот 100 ÷ 400 км определяется многофакторным процессом, в котором участвуют: температура ионов, температура, гирочастота и эффективная частота соударений электронов, эффективная мощность излучателя (с учетом коэффициента усиления антенной системы). Вертикальный размер возмущенной области определяется текущими геофизическими условиями и высотой отражения нагревной волны, а горизонтальный — диаграммой направленности антенны с учетом фактора нелинейности. Так, для высот вблизи максимума слоя F2 изменение электронной плотности будет отрицательным, и величина относительного возмущения растет с высотой [3].

Для упрощенного случая двумерно-неоднородной изотропной среды, обладающего большей наглядностью механизмов рефракции луча, система лучевых уравнений (предложена Тининым) может быть представлена в виде, удобном для физического понимания [7]:

$$\frac{dr}{d\theta} = r tg\beta, \quad \frac{d\beta}{d\theta} = -\frac{1}{2\mu^2} \left| tg\beta \frac{\partial\mu^2}{\partial\theta} - r \frac{\partial\mu^2}{\partial r} \right| + 1, \tag{1}$$

где  $\theta$  — угловое расстояние по дуге большого круга,  $\beta$  — текущее значение угла возвышения по лучевой траектории,  $\mu(\vec{r})$  — вещественная часть показателя преломления. В частности, из уравнений легко видеть, что траектория луча определяется не только показателем преломления, зависящим от плазменной частоты, но и градиентами показателя преломления (в частности, градиентами электронной плотности). Наибольшее влияние возмущенной области проявляется при ее локализации на высотах отражения зондирующих волн, т. е. в окрестности средней точки радиотрассы наклонного зондирования.

Интересным радиофизическим эффектом при многочастотном радиозондировании крупномасштабной возмущенной области ионосферы с пониженным значением электронной концентрации является возможный захват зондирующих волн в полость (имеется некоторая аналогия с низкодобротным резонатором) с последующим приходом в точку приема [5]. Возмущение электронной плотности в модельном представлении, учитывающем основные механизмы взаимодействия мощного вертикально падающего на ионосферу излучения с плазмой [3], в упрощенном виде может быть представлена как

$$\Delta f_N^2(r,\rho) = -\Delta f_{N_{\max}}^2 \times \left\{ a_1 \exp\left[ -\left(\frac{r-r_m}{\Delta r}\right)^2 \right] + a_2 \frac{r-r_0}{r_m - r_0} \right\} \times \exp\left(-\frac{\rho^2}{\Delta \rho^2}\right) \left(\frac{r-r_0}{r_m - r_0}\right), \quad r_0 \le r \le r_m$$

$$\exp\left[ -\left(\frac{r-r_m}{\Delta r}\right)^2 \right] \exp\left(-\frac{\rho^2}{\Delta \rho^2}\right), \quad r > r_m$$
(2)

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

где  $a_1 + a_2 = 1$ ;  $\rho$  — расстояние по горизонтали от радиус-вектора  $\vec{r}_m$ ,  $\Delta\rho$  — характерный горизонтальный размер, масштаб которого определяется диаграммой направленности главного лепестка антенны нагревного стенда,  $\Delta r$  — вертикальный размер. Выбором параметров  $a_1$  и  $a_2$  можно высотное распределение возмущения плазменной частоты сделать знакопеременным: отрицательным в окрестности точки отражения  $r_m$  и положительным в нижней ионосфере, что соответствует современным представлениям о физике взаимодействия мощного вертикального радиоизлучения с ионосферной плазмой [2]. Наличие множителя  $r - r_0$  в (2) необходимо для выполнения граничных условий на нижней границе ионосферы —  $r_0$ . Лучевые траектории для частоты 3,8 МГц в искусственном ионосферном резонаторе ( $\Delta f_N^2(r_m, 0)/f_N^2 \approx 40\%$ ,  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 0$ ,  $r_m = 6570 \kappa m$ ,  $\Delta r = 20 \kappa m$ ) приведены на рис. 1a, а структура синтезированного следа, состоящего из двух областей, изображена на ионограмме H3 между следами третьей и четвертой кратности — рис. 16. Обе ветви области I формируются симметричными относительно возмущения траекториями (рис. 1a, тип 1). Область II имеет более сложную структуру: её нижняя ветвь образована симметричными, а верхняя — менее устойчивыми, асимметричными лучевыми траекториями (рис. 1a, тип 2).



Рис. 1. Лучевые траектории (а) и структура межслоевой области на ионограмме НЗ (б) при сильном отрицательном локальном возмущении верхней ионосферы.

Физический механизм захвата во многом соответствует механизму стабилизации нелинейного волнового пучка [7] — в обоих случаях имеется устойчивое решение на искусственных градиентах электронной плотности. При высвечивании из резонатора под возмущенной областью на поверхности Земли формируется локализованная освещенная зона, т. е. имеет место прожекторный эффект. В таком резонаторе (рис. 1а) лучевые траектории проходят в условиях пониженных значений показателя преломления и, следовательно, сигнал будет иметь повышенный набег группового пути, т. е. след на ионограмме НЗ будет локализован между следами базовых мод (третья и четвертая кратность на рис. 16). В эксперименте, как предполагается, при учёте ещё и тонкой структуры возмущения в виде мелкомасштабных неоднородностей, следы таких резонаторных мод выглядели бы как диффузное облако с частотной зависимостью (рис. 16). Частотный интервал существования следа небольшой, в силу слабости градиентных сил, и зависит от степени возмущения, которая, в свою очередь, определяется излучаемой мощностью, уровнем отражения нагревной волны и условиями потерь энергии при распространении до точки отражения. Сам эффект носит пороговый характер, т. е. необходимо наличие достаточно значимого градиента показателя преломления на границе возмущенной области. С приближением частоты нагрева к критической частоте F2-слоя ионосферы частотный интервал существования резонаторных мод будет смещаться к МПЧ базовых мод. Смещение в сторону МПЧ будет наблюдаться и при горизонтальном смещении ВО от области средней точки. Для регистрации эффекта также необходим и высокий потенциал зондирующих сигналов, поскольку захват осуществляется в довольно узком секторе углов излучения. Следует отметить, что формирование резонаторных мод происходит на геометрооптической основе и, следовательно, их следы должны бы иметь большую

3

энергетику, чем следы ракурсного рассеяния на магнитоориентированных вытянутых мелкомасштабных неоднородностях.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2007 году (25–31 августа 2007 г.) был поставлен первый из серии в своем роде уникальных экспериментов по исследованию свойств ракурсного рассеяния на искусственных мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностях плазмы, схема которого представлена на рис. 2 [6]. В дальнейшем подобные экспериментальные исследования, с добавлением возможностей приемных установок, были повторены еще в 2008–2010 гг. [6, 9] с добавлением пункта регистрации в Нижнем Новгороде. В основе данных исследований лежит применение принципа ЛЧМ-радара бистатической конфигурации к зондированию искусственно возмущенной области с элементами томографии. Т. е., излучение ЛЧМ-сигнала производилось из ИЗМИРАН передатчиком «Мицар» с непрерывной мощностью излучения ~ 450 Вт со скважностью 5 мин и главный лепесток передающей антенны в азимутальной плоскости был направлен в восточном направлении. Прием зондирующих сигналов осуществлялся в двух пунктах: Ростове-на-Дону и Йошкар-Оле (дальняя и ближняя зона области нагрева). Как можно видеть из рис. 2 условия регистрации ракурсного рассеяния хорошо соответствовали п. Ростов-на-Дону и практически их невозможно было выполнить для п. Йошкар-Ола, вследствие направления геомагнитного поля.



Рис. 2. Схема эксперимента августа 2007 г. по ЛЧМ-радиозондированию искусственно возмущенной области ионосферы. Схематично представлены возможные пути освещения ВО и приема рассеянного сигнала в п. Ростов-на-Дону.

Нагрев осуществлялся обыкновенной волной с эквивалентной мощностью (с учетом коэффициента усиления антенной системы) ~ 80 МВт и периодичностью: 10 мин — нагрев, 5 мин — пауза. Для сравнения эффективности возбуждения искусственной ионосферной турбулентности при различных углах падения мощного радиоизлучения на ионосферу наклон главного лепестка диаграммы направленности антенны стенда варьировался в пределах от 8° до 24° к югу от географического зенита, т.е. в направлении геомагнитного зенита.

В целом, в серии экспериментов 2007–2010 гг. было показано устойчивое формирование анизотропного ракурсного рассеяния, что проявлялось в стабильной регистрации сигналов ракурсного рассеяния в дальней зоне (Ростов-на-Дону) (рис. 4) и практически полным их отсутствием в пунктах ближней зоны (Йошкар-Ола и Нижний Новгород) [6, 9]. Исключительным случаем является регистрация следов зондирующих сигналов в Йошкар-Оле 31.08.2007 в интервале 21:30 – 22:10 МТ = МДТ+1 (17:30 – 18:10 UTC), явно обусловленных работой нагревного стенда, в форме диффузного облака в достаточно узкой частотной полосе (рис. 3). При этом имеет место некоторый частотный разрыв между основным, базовым следом моды 1F2, и дополнительным. След имеет ярко выраженную положительную частотную зависимость группового запаздывания, характеризуется большой энергетикой – отношение сигнал/шум практически на 20 дБ выше, чем стандартный уровень следов ракурсного рассеяния, аномальным групповым запаздыванием, временной инерционностью и локальностью проявления, в частности, он не наблюдается в Ростове-на-Дону (рис. 4). В паузе работы нагревного стенда дополнительный след хотя и ослабевает, но не исчезает полностью, как след ракурсного рассеяния. Так на рис. 3 (правая панель) отмечается его наличие через 2 мин после выключения нагрева, хотя, как показано в уникальном эксперименте с радиотелескопом УТР-2 [10], время генерации мелкомасштабных рассеивающих неоднородностей составляет ~ 10 сек., а максимальное время релаксации процесса ракурсного рассеяния не превышает  $\sim 50$  сек (рис. 5). Также следует отметить два важных момента в данных ракурсного рассеяния: наличие четко выраженной нижней границы и протяженность тела следов. Первое обстоятельство говорит о наличии достаточно резкой граница BO, а второе — о ее горизонтальном размере. Длительность следа составляет ~ 1 мсек как на рис. 4, так и на рис. 5, т.е. проходимое расстояние ~ 300 км, и это соответствует двойной оптической длине (в силу малости углов — горизонтальному размеру) возмущенной области. Т. е. геометрический горизонтальный размер составляет ~ 100 – 130 км.

Из рисунка 6, иллюстрирующего геометрию ВО на основе модельных расчетов с учетом данных ВЗ в ИЗМИРАН, видно, что ее прямое освещение передатчиком из ИЗМИРАН начинается с частоты ~ 7.8 МГц, когда радиоизлучение, в форме О-компоненты, начинает проходить сквозь ионосферу до высоты локализации искусственного возмущения, т. е. формирование «нелинейной» моды начинается сразу после прямого прохождения радиоизлучения до возмущенной области. При этом частотная зависимость следа качественно соответствует структуре диффузной области ионограммы НЗ при наличии искусственного резонатора (рис. 2), а высокая энергетика соответствует представлениям о геометрооптическом механизме захвата зондирующего излучения. Для сравнения на рис. 7 представлен случай регистрации тоже достаточно редкого события — ракурсного рассеяния в Нижнем Новгороде для верхних лучей (отмечен стрелочкой на рисунке). Условия ракурсности в ближней зоне могут, в лучшем случае выполняться, только для верхних лучей, рис. 5 (левая панель) и для Нижнего Новгорода, в силу склонения геомагнитного поля на восток (~ 10°), они более реалистичны. Однако, верхние лучи имеют более низкую энергетику и характерную зависимость от частоты, что и обуславливает специфический, спадающий с ростом частоты след, значительно более слабый (на 2– 3 порядка), чем след «нелинейной» моды на рис. 3.



Рис. 3. Ионограммы наклонного радиозондирования ионосферы (31.08.2007) со следами проявления искусственного ионосферного возмущения в Йошкар-Оле: при работе (слева) и в паузе (справа) нагревного стенда.

5



Рис. 4. Ионограммы наклонного радиозондирования ионосферы Москва(ИЗМИРАН) – Ростов-на-Дону во время работы и паузы нагревного стенда «Сура» (31.08.2007 17:51 и 17:56 UT). След ракурсного рассеяния в частотном диапазоне 10 – 14 МГц.

7



Рис. 5. Регистрация ракурсного рассеяния на мелкомасштабных магнито-ориентированных неоднородностях, генерируемых нагревным стендом «Сура», на радиотелескопе УТР-2 (РИНАНУ, Харьков) – 29/03/1995. Рабочая частота ~ 20 МГц.



Рис. 6. Облучение возмущенной области на частотах 7.0 МГц (а) и 8.0 МГц (б) 31 августа 2007 г. 18:00 UT из пункта Москва (ИЗМИРАН) для обыкновенной компоненты волнового поля.



Рис. 7. Регистрация ракурсного рассеяния диагностического ЛЧМ-излучения на мелкомасштабных неоднородностях 30.08.2012 18:01 МТ (левая панель — нагрев) и 18:05 (правая панель - пауза), обусловленного освещением ВО верхним лучом моды 1F2.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Структура «нелинейного» следа, его динамика и энергетические характеристики позволяют утверждать, что в основе его образования лежит другой принцип, чем ракурсное рассеяние и, как предполагается, это первое экспериментальное обнаружение проявление радиофизического свойства крупномасштабной неоднородности электронной плотности — искусственного ионосферного резонатора. К сожалению, из всей серии экспериментов это единственное зарегистрированное проявление необычного поведения дополнительных следов, обусловленных нелинейным взаимодействие мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой. Данный случай характеризуется высоким положением главного ионосферного максимума и высокой критической частотой, что обусловило большую высоту отражения «нагревной» волны — 270 км. Направление главного лепестка антенной системы стенда составляло 20° к югу, т. е. в направлении магнитного зенита, когда нагрев электронов идет максимально эффективно [11]. Эффект носит ярко выраженный пороговый характер — примерно за час раньше практически не видно его проявления, т. е. он проявился на грани возможностей «Суры» и постановки диагностического эксперимента. Также нужно отметить, что геометрия эксперимента (рис. 2) не является оптимальной конфигурацией для регистрации эффекта захвата — он был поставлен на исследование свойств ракурсного рассеяния. Более эффективным представляется вариант с размещением передатчика в Нижнем Новгороде и приемом в Йошкар-Оле и Казани.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая совокупность результатов анализа: высокая энергетика следа, аномальное запаздывание и временной масштаб существования позволяет утверждать, что рассматриваемый дополнительный след на ионограмме H3, по-видимому, обусловлен физически другим механизмом — захватом зондирующей волны в искусственный ионосферный резонатор с последующим высвечиванием в ближнюю область нагревного стенда «Сура».

#### Признательность

Авторы признательны коллегам по проведению экспериментальных исследований 2007-2012 гг: Иванову В.А., Урядову В.П., Вертоградову Г.Г. и Валову В.А.

# EFFECT OF A CAPTURE OF THE PROBING RADIO WAVES INTO ARTIFICIAL IONOSPHERIC RESONATOR

The results of phenomenological analysis of the oblique chirp-sounding data in the heating experiments with possible registration of the capture effect of the diagnostic radio waves into artificial large-scale electron density cavity and spot lighting the near-zone heating facility "Sura" are presented. Possible mechanisms of the additional track formation in the oblique radio-sounding ionograms of the ionosphere are discussed.

**KEYWORDS**: RADIO-SOUNDING OF THE IONOSPHERE, DIAGNOSTIC OF ARTIFICIAL MODIFICATION OF THE IONOSPHERE, ENHANCED SMALL-SCALED IRREGULARITIES, ASPECT SCATTERING RADIO-WAVES.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т.177. №11. С.1145-1177.
- Фролов В.Л., Бахметьева Н.М., Беликович В.В., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Комраков В.Г., Котик Д.С., Митяков Н.А., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Сергеев В.Н., Терещенко Е.Д., Толмачева А.В., Урядов В.П., Худукон Б.З. Модификация ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением // УФН. 2007. Т.177. №3. С.330-340.
- Бахметьева Н.В., Бенедиктов Е.А., Бочкарев Г.С., Горохов Ю.В., Еременко В.А., Игнатьев Ю.А., Кольцов В.В., Крашенинников И.В., Лобачевский Л.А., Лянной Б.Е., Матюгин С.Н., Черкашин Ю.Н., Шавин Н.Б. Изменение дистанционно-частотных характеристик наклонного зондирования в условиях

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

искусственного возмущения верхней ионосферы. // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т.25. №2. С. 233-238.

- Бочкарев Г.С., Кольцов В.В., Крашенинников И.В., Лянной Б.Е. Вариации траекторных характеристик сигналов НЗ в условиях искусственно возмущенной ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т.30. № 6. С. 697-702.
- 5. Крашенинников И.В., Лянной Б.Е. Модовая структура ионограмм НЗ при некоторых видах искусственного возмущения ионосферы. // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т.27. № 6. С.936-942.
- 6. Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Кубатко С.В., Понятов А.А., Черкашин Ю.Н., Крашенинников И.В., Валов В.А., Комраков Г.П., Макаров А.В., Бредихин Д.В. Зондирование искусственно возмущенной области ионосферы с помощью ионозонда/пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала. // Изв. вузов. Радиофизика, 2009. Т.LII, №4. С. 267-277.
- 7. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
- 8. Черкашин Ю.Н., Еременко В.А. Нелинейные волноводы нового типа в нестационарной ионосфере. // Нелинейный мир. 2012. Т. 10. № 10. С. 672-677.
- Вертогралов Г.Г., Вертоградова Е.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., Комраков Г.П., Крашенинников И.В., Черкашин Ю.Н., Валов В.А., Бредихин Д.В., Макаров А.В. Кластерная структура искусственной ионосферной турбулентности по данным радарных измерений с помощью ионозондарадиопеленгатора. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т.LV, №1-2. С. 1-13.
- Hysell D.L., Kelley M.C., Yampolsky Y.M., Beley V.S., Koloskov A.V., Ponomarenko P.V. and Tyrnov O.F. HF radar observations of decaying artificial field-aligned irregularities. // Journal of Geophysical Research. 1996. V. 101. No. A12. P. 26,981-26,993.
- Honary F., Borisov N., Beharell M., Senior A. Temporal development of the magnetic zenith effect. 2011. J. Geophys. Res., V.116, A06309, doi:10.1029/2010JA016029.