

Лидарные отражения верхней атмосферы Камчатки в условиях геомагнитных возмущений

Бычков В.В.¹, Пережогин А.С.¹, Шевцов Б.М.¹, Полех Н.М.²

¹ Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Россия

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, Россия
vasily@ikir.rupolekh@iszf.ru

Приводятся экспериментальные данные, показывающие корреляцию сигналов обратного рассеяния света на длине волны 532 нм с параметрами, определяющими содержание плазмы в ночном слое F2 ионосферы. На основании проведенного анализа лидарных данных и геофизической обстановки обсуждается гипотеза о возможной роли ридберговских атомов в формировании лидарных отражений на ионосферных высотах.

Введение

В работе [1] по данным лидарных и ионосферных наблюдений за 28 марта 2008 г. показано, что в этот день разница среднего сигнала от области высот 200-300 км, за вычетом независимо измеренного фонового сигнала, коррелирует с содержанием плазмы в области максимума ночного слоя F2 ионосферы. В работе обосновывается возможный физический механизм, объясняющий эти корреляции – формирование лидарных отражений с ионосферных высот в результате рассеяния на высоковозбужденных ридберговских атомах в метастабильных состояниях, возникающих в результате возбуждения электронным ударом. Проведенный анализ данных лидарных наблюдений за 2008-2012 годы обнаружил еще ряд дней с аналогичными корреляциями, которые приводятся в настоящей работе.

Результаты наблюдений

На рисунке 1в приведен ход foF2, критической частоты слоя F2 за 6 сентября 2008 г., построенный по 15-минутным значениям автоматической ионосферной станции (АИС) Камчатки, на рис. 1 а, б – суммарные лидарные сигналы обратного рассеяния от слоев 150-200, 200-300 и 300-400 км, построенные по рядам лидарных данных с 15-минутным накоплением. Специально измеренный в промежутках между лазерными импульсами фоновый сигнал из лидарного сигнала вычтен. Коэффициенты корреляции между суммарным сигналом от слоя 200-300 км и сигналами от слоев 150-200 и 300-400 км равны 0.83 и 0.88 соответственно. Такое поведение лидарных данных не характерно для сигналов с этих высот. Общепринято представление о том, что для высот больше 100 км лидарный сигнал содержит только шумовую компоненту и импульсы последствия ФЭУ. Синхронный рост суммарного сигнала от областей 150-200 и 200-300 км и 300-400 км после 14:30 UT не находит объяснения в рамках этих представлений. Нетипичное возрастание критической частоты слоя F2 после 15 UT коррелирует с ростом лидарных сигналов от слоев ионосферы во всей области 150-400 км. При этом действующая высота слоя F2 уменьшается примерно на 10 км. Очень похожие данные получены в лидарных и ионосферных наблюдениях в предыдущий день, 05.09.2008. Рисунки приведены в работе [1].

Визуально ход кривой foF2 соответствует ходу лидарных сигналов, наиболее заметна корреляция с момента 14:30 UT. Значимых значений коэффициентов корреляций на полных рядах данных foF2 и лидарных сигналов не обнаружено.

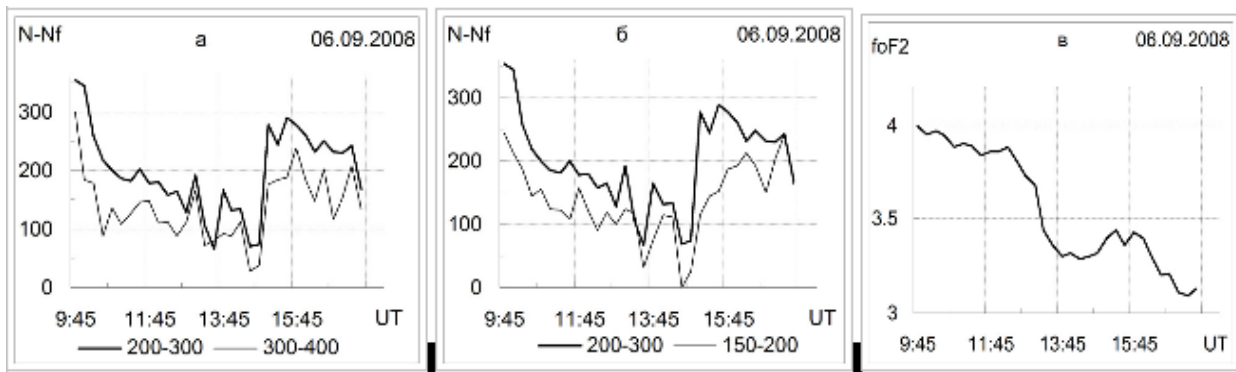


Рис. 1. Ход лидарных сигналов (а, б) и 06.09.2008 (б), и критической частоты слоя F2 (в)

Геофизическая обстановка

Корреляции 5 и 6 сентября 2008 г. имели место на следующий день после геомагнитного возмущения произошедшего 4 сентября. Среднесуточное значение Kp-индекса 04.09.2008 равнялось 3.8, в 3:00 UT в этот день имел место максимум возмущения с планетарными индексами Kp=6, Ap=80 нт, Dst= -50 нт, местные K-индексы равнялись 4 4 4 3 4 4 2 -1. В дни лидарных наблюдений 5 и 6 сентября местные K-индексы равнялись 2 2 1 1 3 0 1 2 и 2 1 1 1 3 2 1 2, соответственно. Индекс Kp [<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>] 5 и 6 сентября имел значения ~ 2 , Ap ~ 10 , Dst ~ -20 .

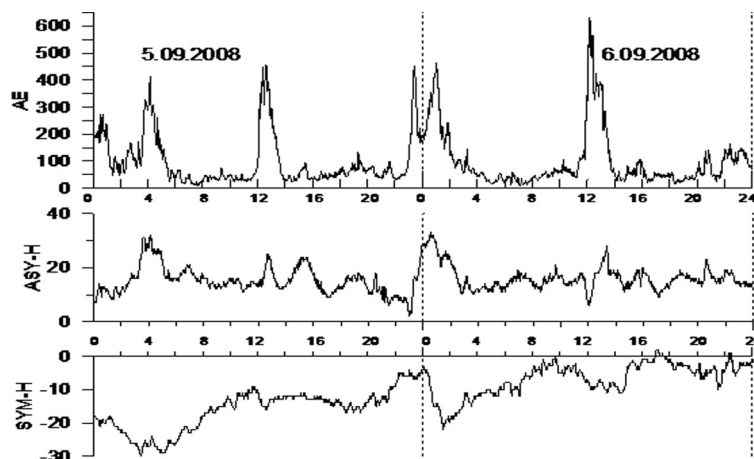


Рис. 2. Значения AE-индекса и среднеширотных индексов ASY-H и SYM-H 5 и 6 сентября 2008 года.

Согласно данным центра Киото, Япония [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>] в соответствии со значениями AE-индекса 5 сентября в 12 UT и 6 сентября вблизи нуля и 12 UT имели место геомагнитные возмущения, суббури (рис. 2). SKY-камерой ночного неба 5 сентября 2008 г. с 12:10 до 13:20 UT зарегистрировано перемещающееся ионосферное возмущение на изображениях, снятых на длине волны 557 нм. Суббурия в ноль часов UT 6 сентября происходила в дневное местное время. Вблизи 12 UT, 6 сентября перемещающихся ионосферных возмущений SKY-камерой не зафиксировано ни на одной из рабочих частот.

По данным ионосферной станции ИКИР спорадические Es 5 и 6 сентября наблюдались в интервале высот 100-114 км. Но однозначно классифицировать их как корпускулярные нельзя. Одновременно наблюдались высокие для ночных условий значения f_{min} , порядка 1.5-1.65 МГц, что приводит плохому отображению начала следа foF2 и следа Es для

обыкновенной волны, что осложняет идентификацию типа слоев.

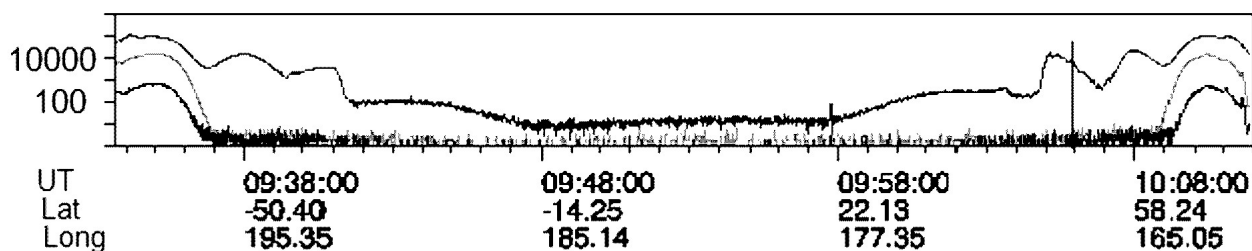


Рис. 3. Потоки электронов, измеренные ИСЗ Деметер 06.09.12.

На рис. 3 приведены результаты измерений потоков электронов ИСЗ Деметер на ближайшей к Камчатке “восточной” траектории 6 сентября проходившей на несколько градусов восточнее Камчатки около 22 часов местного времени. Верхняя кривая соответствует потоку электронов в интервале энергий 92-526 кэВ. В северном полушарии на ней наблюдались три максимума с потоками электронов $(2-3) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ на широтах 48 и 58 градусов и потоком порядка 10^5 с^{-1} на широтах 65-70 градусов. Примерно такая же трехгорбая структура потоков электронов вдоль траектории полета спутника сохранялась и на следующей траектории, проходившей через 1 час 38 минут западнее Камчатки, и на обеих траекториях за 5 сентября 2008 г. Черной вертикальной линией отмечен момент пересечения спутником широты 51° с.ш. Такая аппроксимация расположения лидарной станции связана с учетом наклона геомагнитного поля. В районе с. Паратунка, расположенном на 52.9° с.ш., магнитное наклонение поля равно 65° и потоки электронов, измеренные спутником на высоте 660 км, на высоте 100 км отклонятся к северу на $\sim 2^\circ$.

Примерная аппроксимация спектра высыпавшихся электронов и расчет скорости ионизации показали, что такие потоки при попадании в ночную атмосферу вызовут увеличение ионизации в области 60-90 км на $1-2 \text{ 1/см}^3/\text{с}$. Такое увеличение скорости ионизации в ночных условиях может увеличить концентрацию заряженной компоненты в этой области, что в свою очередь приведет к росту поглощения радиоволн в единицы мегагерц и увеличению значений f_{min} . Для увеличения концентрации в области слоя F2 ионосферы необходимы высыпания мягких электронов, с энергиями меньше 1 кэВ, которые спутником Деметер не измерялись.

Обсуждение результатов.

В работе [1] приведен пример корреляции лидарных сигналов с содержанием плазмы в ночном слое F2 ионосферы. Присутствие на высоте 150 км спорадических Es корпускулярного типа позволило оценить характерную энергию высыпавшихся потоков электронов в ~ 0.5 кэВ, и скорости проводимой ими ионизации на высотах слоя F2. Процесс ионизации электронным ударом всегда сопровождается образованием возбужденных атомов в метастабильных состояниях, поскольку при этом не соблюдаются правила отбора и могут образовываться атомы с большими значениями углового момента и достаточно большим временем жизни. Проведенные в работе оценки показали, что для высот больше 200 км скорость возбуждения достаточна, чтобы обеспечить скорость поступления фотонов на зеркало телескопа, наблюдавшуюся 28.03.2008.

Приведенный в работе [1] рост ионизации в ночном слое F2 ионосфере 28.03.2008 имел примерно такую же величину, продолжительность и даже форму, как и в случае, приведенном на рис. 1в. Достаточно большая длительность (1.5 часа) этого повышения и одновременное уменьшение действующей высоты слоя F2 не оставляют сомнений в реальности возрастания концентрации плазмы в ночном слое F2 и его протяженности по

высоте. Это позволяет применить к данному случаю те же оценки скорости дополнительной ионизации, что и в работе [1] и предположить наличие высыпаний мягких электронов между 14:30 и 16:15 UT. Отсутствие спорадических слоев корпускулярного типа на высотах области E в это время может объясняться более мягким спектром высыпавшихся электронов или большим поглощением в слое D.

Таким образом, повышение лидарного сигнала с высот больших 200 км может быть объяснено рассеянием (либо поглощением с последующим переизлучением) фотонов с длиной волны 532 нм на сильно возбужденных атомах ($n \sim 10$) в метастабильных состояниях, образующихся при возбуждении электронным ударом. Корреляции лидарного сигнала от области 150-200 км требуют дополнительных оценок и, поскольку частота соударений с нейтралами там выше, а время жизни возбужденных состояний на этих высотах меньше.

Литература

1. *Бычков В.В., Шевцов Б.М.* Динамика лидарных отражений верхней атмосферы Камчатки и ее связь с явлениями в ионосфере // Геомagnetизм и аэрономия. – 2012. – Т. 52. – No. 6. С. 837–844.

Lidar backscattering signals from the upper atmosphere at Kamchatka in geomagnetic disturbances

Bychkov V.V.¹, Perezhogin A.S.¹, Shevtsov B.M.¹, Polech N.M.²

¹ *Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS, Russia*

² *Institute of Solar-Terrestrial physics SB RAS, Russia*

Experimental data showing correlation of back scattering signals at the wavelength of 532 nm with the parameters determining plasma content in nighttime ionospheric F2 layer are presented. On the basis of the performed analysis of lidar data and geophysical state, a hypothesis on possible role of Rydberg atoms in the formation of lidar reflections at ionospheric altitudes is discussed.