

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.135-138

ВОЗМУЩЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НАД ТАЙФУНОМ VONGFONG 2014 г. ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ SWARM

В.А. Мартинес-Беденко¹, В.А. Пилипенко^{1,2}, В.И. Захаров³

¹Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

³МГУ им. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аннотация. Сильные метеорологические возмущения в атмосфере, сопровождающиеся генерацией акустико-гравитационных волн и турбулентности, могут оказывать влияние на плазму ионосферы и геомагнитное поле. Для поиска этих эффектов мы проанализировали данные электромагнитных и плазменных измерений на низкоорбитальных спутниках SWARM во время пролетов над интенсивной фазой тайфуна VongFong 2014 г. Зарегистрировано наличие в верхней ионосфере "магнитной ряби" - флуктуаций малой амплитуды (0.5-1.5 нТл) с преобладающим периодом 5-10 с, вызванных мелкомасштабными продольными токами. Эти токи, по-видимому, генерируются акустическими волнами в нижней ионосфере.

Введение

Геофизические процессы с большим выделением энергии в литосфере (землетрясения), атмосфере (тайфуны, ураганы), магнитосфере (магнитные бури и суббури) захватывают все геофизические оболочки. Сильные метеорологические возмущения, сопровождающиеся генерацией акустико-гравитационных волн (АГВ) и турбулентности в атмосфере, могут оказывать влияние и на ионосферу. Ионосферный отклик на тайфуны был обнаружен с помощью радиофизических методов мониторинга ионосферы: наблюдений доплеровского сдвига частоты радиосигналов [Xiao et al., 2007], фазовые наблюдения на СДВ радиотрассах [Rozhnoi et al., 2014], измерения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы до сигналам спутниковой навигационной системы GPS [Polyakova and Perevalova, 2013].

Возможный канал воздействия атмосферных процессов на возмущения ионосферной плазмы и электромагнитные поля связан с турбулентными движениями нейтральной компоненты в нижней ионосфере [Pokhotelov et al., 1995]. Увлечение заряженных частиц движениями нейтральной компоненты ионосферы приводит к локальной генерации электрических токов и возмущений плотности плазмы. Возбуждаемая в Е-слое токовая система включает продольные токи, которые переносят возмущение в верхнюю ионосферу [Surkov et al., 2004; Zettergren and Snively, 2015]. Исходя из этих представлений, можно ожидать повышения уровня электромагнитных шумов и плазменной турбулентности над тайфунами и ураганами, которое можно было бы зарегистрировать на низкоорбитальных спутниках [Исаев и др., 2010].

Благодаря высокой чувствительности магнитометров на борту последнего поколения низкоорбитальных спутников, удалось обнаружить эффекты генерации магнитных возмущений, вызванных воздействием АГВ на проводящую ионосферную плазму. Локальные всплески магнитных флуктуаций, регистрируемые на средних широтах на ночной стороне, могут быть следствием продольных токов, генерируемых среднемасштабными перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИВ) [Park et al., 2015]. По данным спутника CHAMP (~500 км), Nakanishi et al. [2014] обнаружили наличие "магнитной ряби" на средних и низких широтах - флуктуаций с малой амплитудой (от 1 до 5 нТ), перпендикулярных геомагнитному основному полю, с характерным периодом около нескольких десятков секунд. Эти флуктуации малой амплитуды отличаются от регистрируемых на низкоорбитальных спутниках Рс2-3 пульсаций тем, что наблюдаются в любое местное время, но их амплитуды днем в ~3 раза больше, чем ночью. Их появление и амплитуды не зависят от параметров солнечного ветра и от геомагнитной активности. Авторы полагают, что наблюдаемые магнитные флуктуации обусловлены пространственной структурой продольных токов от ионосферного динамо, возбуждаемого АГВ, распространяющимися от нижней атмосферы до ионосферы. Спутники SWARM (~500 км) подтвердили наличие в верхней ионосфере на средних и низких широтах "магнитной ряби" малой амплитуды (0.1-5 нТл) [Aoyama et al., 2017]. Статистический анализ 54 тайфунов показал, что средние амплитуды этих магнитных флуктуаций во время активности тайфуна больше, чем при спокойных метеороусловиях. Используя данные спутников SWARM, Iyemori et al. [2015] подтвердили, что "магнитная рябь" представляет собой пространственную структуру из мелкомасштабных продольных токов. По их оценкам основной период волны попадает в диапазон акустических волн.

Однако достоверность обнаруженных эффектов оставляет некоторые сомнения, т.к. пролет спутника в нужном месте в благоприятный период (слабая геомагнитная возмущенность, отсутствие плазменных

пузырей, ...) является крайне редким событием. В данной работе мы приведем дополнительные свидетельства метеорологического воздействия на ионосферу и геомагнитное поле по данным электромагнитных измерений на спутниках SWARM во время пролетов над тайфуном VongFong 2014 г.

Данные и их анализ

Спутниковый проект Swarm состоит из трех идентичных аппаратов (А, В и С), работающих на двух разных полярных орбитах: С и А разнесенных на расстояние $\sim 1.4^\circ$ по долготе на высоте ~ 470 км, в то время как орбита В проходит на высоте ~ 510 км (<https://earth.esa.int/web/guest/swarm>). В этом исследовании используются данные измерений вектора магнитного поля с частотой 50 Гц. Данные по регистрации магнитного поля были пересчитаны в локальную систему координат, ориентированную вдоль текущего магнитного поля **В**. Также на аппаратах SWARM велась регистрация плотности плазмы (с частотой опроса 2 Гц) ленгмюровскими зондами.

В центре тайфуна образуется цилиндрическая область с диаметром около 30 км - "глаз" тайфуна, где скорость ветра и давление минимальны. Вокруг расположена стена глаза - цилиндр с радиусом ~ 75 км, в которой скорость ветра достигает максимальных значений (до ~ 100 м/с). К периферии тайфуна скорость ветра уменьшается, доходя до ~ 15 м/с на расстоянии 500-1000 км от его центра.

Данные о траекториях тропических тайфунов получены из базы данных информационной технологической компании Unisys (<https://weather.unisys.com/hurricane>). Эти данные состоят из позиций "глаза" тайфуна и скорости ветра (или интенсивности) в течение жизненного цикла тайфуна. Положение центра тайфуна дается с периодичностью 3 ч. Кроме того, использованы космические снимки в видимом канале камерой MODIS (Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) из Годдардовского Центра Космических Полетов НАСА (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>). По траекторным расчетам определены моменты пролета спутника вблизи тайфуна. В данных по магнитному полю удалялся тренд с критическим периодом 30 с. Значения плотности Ne вдоль орбит приводятся без вычитенного среднего значения $\langle Ne \rangle$ за анализируемый интервал.

Результаты анализа

Рассмотрен тайфун VongFong, двигавшийся от экватора к Японии в западной части Тихого океана в октябре 2014 г. Тайфун развился в приэкваториальной части Тихого океана с 02 до 14 октября 2014 г. Скорость ветра в максимуме составляла почти 80 м/сек. Геомагнитная обстановка во время жизни тайфуна была спокойной: планетарный индекс $K_p < 4$, а величина индекса $|Dst| < 15$ нТ.

Хотя за время существования тайфуна было довольно много случаев пролета спутников вблизи тайфуна, не все из них пригодны для поиска возможных эффектов. На приэкваториальных широтах существует такое характерное явление как экваториальная аномалия - резкие возрастания плотности ионосферной плазмы симметрично по обе стороны от геомагнитного экватора. Также на приэкваториальных широтах регулярно наблюдаются плазменные пузыри [Park et al., 2009] и F-рассеяние [Stolle et al., 2006]. Эти плазменные образования зачастую сопровождаются усилением магнитных флуктуаций. Поэтому измерения непосредственно вблизи геомагнитного экватора (отмечен на карте точечной линией) не рассматривались. С другой стороны, на более высоких, средних широтах интенсивность тайфуна уже значительно убывает. Поэтому для выделения эффектов тайфуна в ионосфере мы рассматривали промежуточные низкие широты.

В период 01:18-01:23 UT 08 окт. 2014 (день 282), оба спутника SWARM-A и -С проходили непосредственно над тайфуном в дневное время (LT $\sim$ 10). Вертикальная проекция орбит спутников

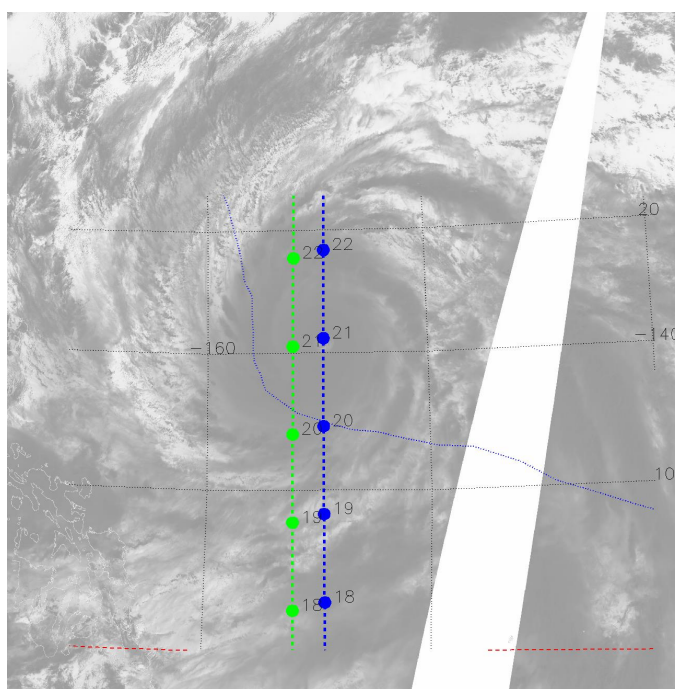


Рисунок 1. Пролет спутников SWARM-A (зеленая линия) и -С (синяя линия) над тайфуном 2014/10/08, 01:15-01:25 UT. Штриховая красная линия обозначает геомагнитный (dip) экватор. Точечная линия показывает траекторию тайфуна по данным портала Unisys.

относительно общей метеорологической картины тайфуна показана на рис. 1. Над "глазом" тайфуна спутники проходили в 01:20.30 UT.

При нахождении над тайфуном, оба спутника зарегистрировали магнитные флуктуации с амплитудами (peak-to-peak) $X \sim 1.5$ nT, $Y \sim 0.5$ nT (рис. 2). Преобладающие периоды флуктуаций 5-10 сек. Флуктуации были чисто поперечные, компонента возмущения вдоль геомагнитного поля отсутствовала $Z \sim 0$. Отсутствие возмущение по Z-компоненте указывает на то, что магнитные флуктуации вызваны продольными токами.

Также на SWARM-A и -C зарегистрирован "пузырь" плазмы с амплитудой $n \sim 8 \cdot 10^4$ м⁻³ на фоне ионосферной плотности $\langle n_e \rangle = (1.0-2.5) \cdot 10^6$ м⁻³ (рис. 2, нижняя панель). Таким образом, относительная величина возмущения плазмы $\sim (3-8)\%$. Временная протяженность пузыря ~ 80 с, что соответствует масштабу пространственной структуры ~ 560 км. Магнитные флуктуации не приурочены к градиентам пузыря, а расплзлись на значительно большее расстояние.

Аналогичная картина плазменных и магнитных возмущений наблюдалась и при других пролетах над тайфуном.

Обсуждение результатов

Рассмотренное явление является одним из частных случаев многоэтапного обмена энергией между волнами и турбулентностью нейтральной атмосферы и возмущениями плазмы ионосферы и магнитного поля. На первом этапе АГВ, генерируемые интенсивными ветрами тайфуна распространяются до ионосферных высот. Благодаря стратификации атмосферы амплитуда АГВ увеличивается с высотой. Область воздействия на ионосферу за счет расхождения волнового фронта оказывается шире, чем характерный размер тайфуна. Низкочастотная часть АГВ ($T > 10$ мин) - внутренние гравитационные волны распространяются вплоть до верхней ионосферы (F-слой), где они вызывают модуляцию плотности ионосферной плазмы.

Высокочастотная часть АГВ - инфразвуковые акустические волны может возбуждаться как ветрами, так и грозовой активностью в области тайфуна. Акустические волны с высокими частотами (> 10 мГц) поглощаются в верхней атмосфере и могут отражаться от резких вертикальных градиентов температуры. Проводящего слоя ионосферы (E-слой), как правило, могут достигать акустические волны с частотами 3-5 мГц [Zettergren and Snively, 2015]. Эти акустические волны генерируют электрические поля и токи. Система генерируемых токов дивергентная, и струи продольного тока вытекают из E-слоя в верхнюю ионосферу, где и могут быть зарегистрированы спутником как флуктуации геомагнитного поля. Возможный минимальный поперечный масштаб возмущения определяется диффузионным распылением.

Зарегистрированные над тайфуном магнитные флуктуации по своим свойствам во многом аналогичны магнитной "ряби", обнаруженной на CHAMP и SWARM [Nakanishi et al., 2014; Aoyama et al., 2017]. Магнитные флуктуации являются результатом генерации продольных токов в E-слое ионосферы под воздействием инфразвуковых колебаний, излучаемых тайфуном. Преобладающий период ~ 10 сек соответствует поперечному масштабу колебаний порядка ~ 70 км. Пространственный масштаб акустической волны $L \sim V_s/f \sim 50$ км, при скорости звука $V_s \sim 0.2$ км/с и частоте $f \sim 4$ мГц. Пролет спутника с $V \sim 7.5$ км/с через такую пространственную структуру даст флуктуации с периодом ~ 7 с, попадающим в диапазон наблюдаемых

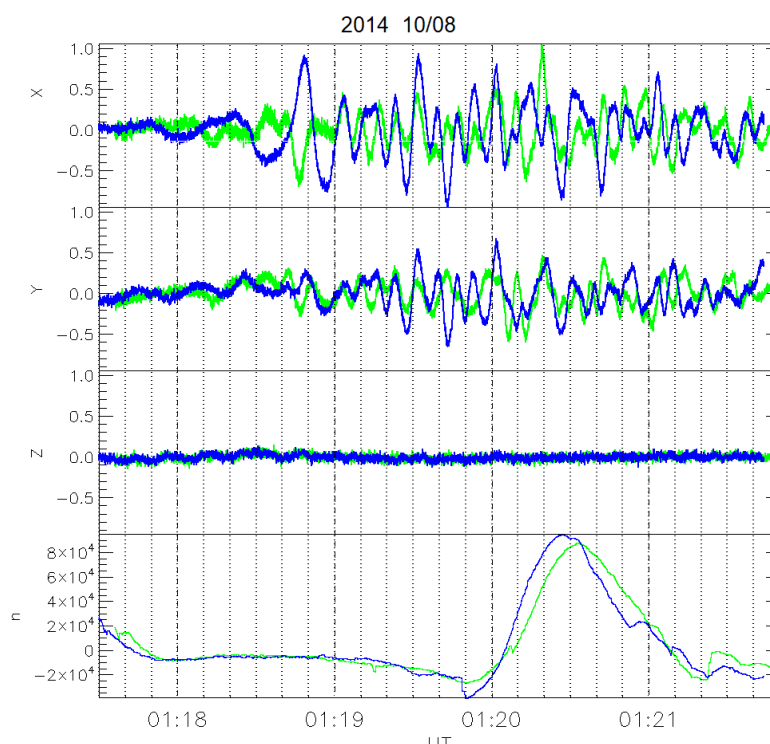


Рисунок 2. Вариации геомагнитного поля (компоненты X, Y, Z в системе координат ориентированной по текущему **B**), и отклонения плотности плазмы n от среднего значения (нижняя панель), зарегистрированные спутниками SWARM A (зеленая линия) и C (синяя линия) 2014/10/08, 01:15-01:25 UT. Временные метки - каждые 10 сек.

периодов магнитных флуктуаций. Для флуктуаций с амплитудой ~ 1 нТл, в поле $B_0 = 10^4$ нТл, и поперечном масштабе 50 км, сопутствующая плотность продольного тока в ионосфере должна быть $j \sim 0.02$ $\mu\text{A}/\text{m}^2$.

Плазменный пузырь является предположительно результатом воздействия внутренней гравитационной волны на ионосферу. Для спутника это возмущение является квазистатическим, время его наблюдения (в среднем порядка 1 мин) соответствует длине волны порядка нескольких сотен км.

Заключение

Анализ данных электромагнитных и плазменных измерений на низкоорбитальных спутниках SWARM во время пролетов над тайфуном VongFong 2014 г. на низких широтах выявил наличие в верхней ионосфере над тайфуном пятно "магнитной ряби" - флуктуаций малой амплитуды ~ 1 нТл с преобладающим периодом ~ 10 сек, вызванной мелкомасштабными продольными токами. Эти флуктуации возбуждаются предположительно инфразвуковыми волнами, излучаемыми тайфуном.

Благодарности. Данные SWARM предоставлены Европейским Космическим Агентством. Работа поддержана грантом РФФИ 18-05-00108 (ЗВИ) и госзаданием ИФЗ (МБА, ПБА).

Литература

- Исаев Н.В., и др. (2010) Возмущения верхней ионосферы, вызванные тайфунами, Геомагнетизм и аэрономия. 50, 253-264.
- Aoyama T., T. Iyemori, K. Nakanishi (2017) Magnetic ripples observed by Swarm satellites and their enhancement during typhoon activity, Earth, Planets and Space, 69:89.
- Iyemori T., et al. (2015) Confirmation of existence of the small-scale field-aligned currents in middle and low latitudes and an estimate of time scale of their temporal variation, Geophys. Res. Lett., 42, 22–28.
- Nakanishi K., et al. (2014) Global and frequent appearance of small spatial scale field-aligned currents possibly driven by the lower atmospheric phenomena as observed by the CHAMP satellite in middle and low latitudes. Earth Planets Space, 66:40.
- Park J., et al. (2009) The characteristics of field-aligned currents associated with equatorial plasma bubbles as observed by the CHAMP satellite. Ann. Geophys. 27:2685–2697.
- Park J., et al. (2015) Nighttime magnetic field fluctuations in the topside ionosphere at midlatitudes and their relation to medium-scale traveling ionospheric disturbances: the spatial structure and scale sizes. J. Geophys. Res., 120, 6818–6830.
- Pokhotelov O.A., Parrot M., Pilipenko V.A., et al. (1995) Response of the ionosphere to natural and man-made acoustic sources, Annales Geophysicae, 13, 1197-1210.
- Polyakova A.S., Perevalova N.P. (2013) Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the North-West Pacific Ocean, Adv. Space Res., 52, 1416–1426.
- Rozhnoi A., Solovieva M., Levin B. et al. (2014) Meteorological effects in the lower ionosphere as based on VLF/LF signal observations. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 2671–2679.
- Surkov V.V., Pokhotelov O.A., Parrot M., et al. (2004) Excitation of the ionospheric resonance cavity by neutral winds at middle latitudes, Ann. Geophys., 22, 2877-2889.
- Stolle C., Lühr H., Rother M., Balasis G. (2006) Magnetic signatures of equatorial spread-F as observed by the CHAMP satellite. J. Geophys. Res., 111, A02304. doi:10.1029/2005JA011184
- Xiao Z, et al. (2007) Morphological features of ionospheric response to typhoon. J Geophys. Res. 112, 1–5. doi:10.1029/2006JA011671.
- Zettergren M.D., Snively J.B. (2015) Ionospheric response to infrasonic-acoustic waves generated by natural hazard events. J. Geophys. Res., 120, 8002–8024.