

ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРНО-МАГНИТОСФЕРНЫХ СВЯЗЕЙ МОЩНЫМ ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ НАЗЕМНЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ

А. С. Белов^{a*}, Г. А. Марков^a, А. О. Рябов^a, М. Парро^b

^a Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603950, Нижний Новгород, Россия

^b Environment Physics and Chemistry Laboratory, Orleans, France

Поступила в редакцию 3 марта 2012 г.

Исследованы характеристики плазменно-волновых возмущений, индуцируемых в околоземной плазме мощным ОНЧ-излучением наземных передатчиков. Показано, что связанные ОНЧ-радиопередатчики мощностью порядка 1 МВт формируют в околоземном пространстве искусственные плазменно-волновые каналы, начинающиеся в нижней части ионосферы над источником возмущающего излучения и пронизывающие вдоль силовых линий магнитного поля всю ионосферу и магнитосферу Земли. На основании результатов измерений бортовой аппаратурой искусственного спутника Земли DEMETER отмечено, что при воздействии излучения одного из наиболее мощных ОНЧ-радиопередатчиков NWC на большей части траектории полета спутника вдоль возмущенной силовой трубки наблюдается генерация квазиэлектростатических (плазменных) волновых процессов, что, вероятно, может свидетельствовать о стимулированной генерации магнитосферного лазера.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование ионосферно-магнитосферных связей является важной задачей современной физики, актуальность решения которой постоянно растет в связи с резким и весьма значительным увеличением техногенной электромагнитной нагрузки на околоземную плазму. До сих пор истинная роль подобных возмущений в физике околоземной плазмы остается открытой. Поэтому неясны и возможные последствия таких нагрузок с точки зрения охраны окружающей среды. Кроме того, ионосфера является средой, через которую осуществляется связь и вещание в КВ-, УКВ- и более высокочастотных диапазонах. Следовательно, нестационарность ионосферы, вызванная ее модификацией, является фактором, который может приводить к ухудшению качества передаваемой информации и надежности каналов связи.

Известно, что исследовательские коротковолновые стелсы своим излучением турбулизуют облучаемую область ионосферы [1–3]. Индуцируемые возмущения переносятся вдоль силовых линий геомагнитного поля преимущественно вверх, и при определен-

ных условиях возможно формирование искусственных волноводных каналов [4, 5] (дактов плотности), вытянутых из ионосферы в магнитосферу и оказывающих существенное влияние на распространение низкочастотных электромагнитных излучений.

Известно также, что действующие связанные ОНЧ-радиопередатчики способны создавать подобные возмущения в значительном пространственном объеме [6]. В настоящее время достаточно широко обсуждаются эффекты влияния излучений мощных связанных ОНЧ-радиопередатчиков на высыпания заряженных частиц из радиационных поясов [7, 8] и генерацию широкого спектра квазиэлектростатических колебаний и волн в верхней ионосфере [9]. Однако остается неясной природа явлений, в результате которых возможно формирование крупномасштабных (глобальных) плазменно-волновых возмущений, оказывающих значительное влияние на локальные ионосферно-магнитосферные связи и характеристики передаваемых сигналов.

Для исследования характеристик таких индуцированных плазменно-волновых структур в настоящей работе проведен анализ результатов измерений бортовой аппаратурой искусственного спутника Земли (ИСЗ) DEMETER параметров плазмы и электро-

*E-mail: alexis-belov@yandex.ru

магнитных полей вдоль ночных траекторий пролета спутника над ОНЧ-радиопередатчиком NWC за период 2005–2010 гг.

2. УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

ОНЧ-радиопередатчик NWC, располагающийся на северо-западном побережье Австралии ($21^{\circ}49' \text{ S}$, $114^{\circ}10' \text{ E}$) является одной из наиболее мощных связанных станций в мире. Мощность передатчика составляет 1 МВт, рабочая частота $f_{tr} = 19.8$ кГц.

Характерные результаты измерений бортовой аппаратурой ИСЗ DEMETER параметров электромагнитных и плазменных возмущений в модифицированной излучением передатчика области ионосферы представлены на рис. 1 для пролета 22.09.2006 г.

На рис. 1 показаны динамические спектры наблюдаемых электрических (а) и магнитных (б) колебаний, распределения температуры T_e электронов (в), концентрации основных ионов плазмы (г) и потока высыпавшихся электронов в диапазоне энергий 70–500 кэВ (д) вдоль траектории пролета спутника. На горизонтальной оси отложены время, значения широты и долготы положения спутника в указанный момент.

Новыми фактами оказались наличие максимума электронной плотности в окрестности экватора и значительные провалы в концентрации ионов кислорода на средних широтах, являющихся основными на данных высотах ионосферы. Такое перераспределение состава ионов наблюдается в вечернее время регулярно и связано, по-видимому, с суточной перестройкой верхней ионосферы и магнитосферы. При этом оказалось, что вечером на высотах пролета ИСЗ концентрация ионов кислорода на средних широтах значительно уменьшается и может стать порядка и даже меньше концентрации более легких ионов H^+ и He^+ .

Наиболее заметным возмущением, индуцированным излучением передатчика NWC, является генерация квазиэлектростатических (плазменных) волновых процессов на большей части траектории полета (рис. 1а).

На высотах внешней ионосферы Земли в области возмущенной мощным ОНЧ-радиоизлучением наземного передатчика магнитной силовой трубки наблюдаются значительные возмущения концентрации плазмы, совпадающие с зоной локализации высокой интенсивности ОНЧ-сигнала NWC. Индуцируемые возмущения концентрации плазмы перено-

сятся вдоль геомагнитных силовых линий, что позволяет идентифицировать их как искусственный плазменно-волновой канал (дакт плотности) с неоднородным (слоистым) распределением плотности плазмы. Плазменно-волновой канал, наблюдаемый на высотах порядка 660 км, по-видимому, начинается на нижней кромке ионосферы, в области отражения излучения ОНЧ-радиопередатчика, пронизывает ее всю и вытягивается в магнитосферу. Характерный поперечный масштаб дакта плотности вдоль траектории движения спутника составляет приблизительно 1000 км. В этом искусственно созданном дакте наблюдается каналированное распространение вистлеров на частоте передатчика и возбуждение интенсивных квазиэлектростатических колебаний и волн в диапазоне частот ниже 20 кГц (рис. 1а).

В области возмущенной магнитной силовой трубки направление скорости ионов меняет знак (см. рис. 2) и в этой области появляются восходящие (в направлении от Земли) потоки. Стимулируемые изменения потоков ионов вносят свой вклад в перераспределение концентрации основных ионов плазмы. В результате такого перемешивания возможны нарушения химических процессов в ионосфере (например, из-за выноса ионов кислорода).

Отметим, что индуцируемые излучением ОНЧ-радиопередатчика NWC возмущения доходят до магнитосопряженной области ионосферы. На рис. 3 и 4 приведены данные об электромагнитных и плазменных возмущениях в облучаемой и магнитосопряженной областях ионосферы для 03.02.2009 г. Обозначения аналогичны обозначениям на рис. 1. Траектории, выбранные из условий близости пролета спутника к возмущающему источнику (рис. 1 и 3) и магнитосопряженной области (рис. 4) в спокойных геомагнитных условиях ($K_p < 1$) для разных времен года, приведены на рис. 5.

Отметим, что в магнитосопряженной области ионосферы наблюдаются интенсивные квазиэлектростатические излучения при отсутствии заметных возмущений концентрации плазмы. По-видимому, в окрестности экватора мала эффективность воздействия поля захваченных излучений на параметры фоновой плазмы, а процессы переноса на таких больших расстояниях размывают неоднородности, сформированные в ионосфере. Сигналы на рис. 4б свидетельствуют как о прямом прохождении излучения передатчика NWC по магнитосферному каналу в магнитосопряженную область, так и о наличии излучений, пришедших с других L -оболочек после ряда переотражений.

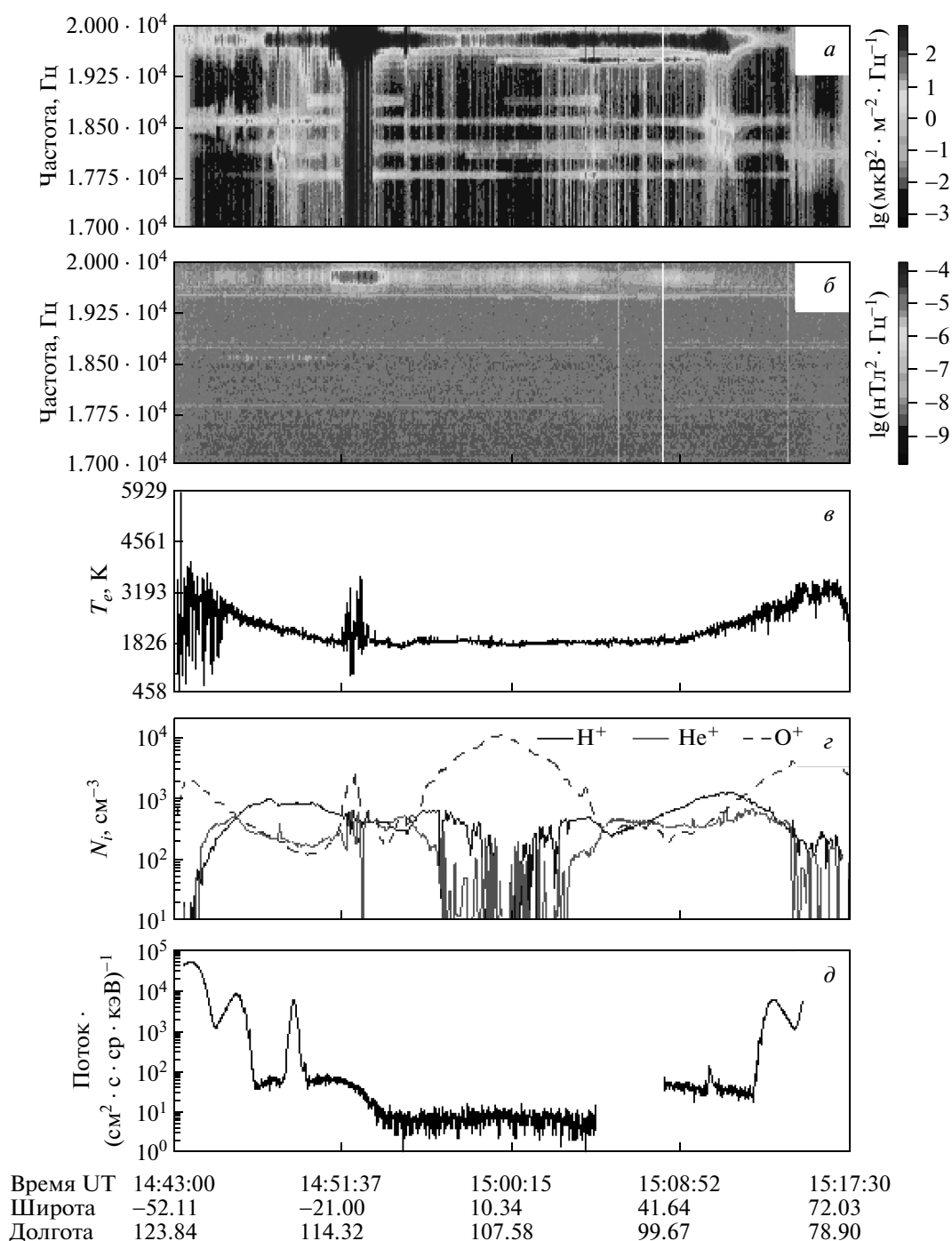


Рис. 1. Электромагнитные и плазменные возмущения, индуцируемые излучением ОНЧ-радиопередатчика NWC в облучаемой области ионосферы для пролета 22.09.2006 г.

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время существуют две основные альтернативные модели генерации квазиэлектроста-

тических излучений в ионосферной плазме при воздействии мощного ОНЧ-излучения наземных передатчиков. Механизмами возбуждения в данных моделях выступают либо нелинейные параметрические эффекты [10], либо процессы рассеяния излу-

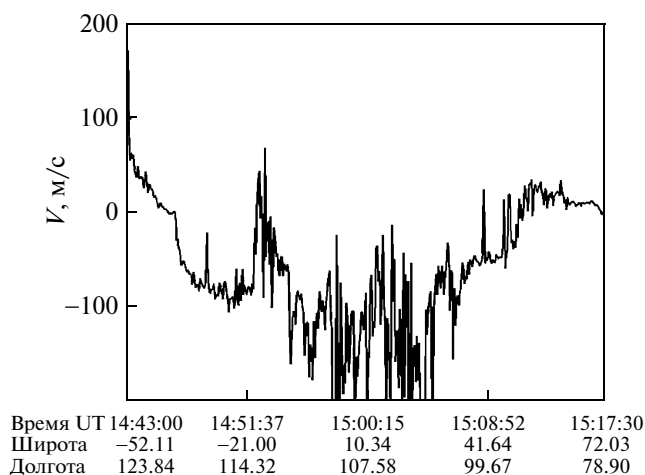


Рис. 2. Изменение скорости потока ионов в направлении геомагнитного поля $\mathbf{B}_0$ вдоль траектории пролета спутника

чения передатчика на мелкомасштабных неоднородностях в волноводном канале [11].

Однако, по нашему мнению, представленные механизмы противопоставлять нельзя, так как оба процесса вносят свой вклад в развитие турбулентности, наблюдаемой в возмущенной области ионосферы. Нелинейные процессы преобладают в области ионосферы, где амплитуда сигнала излучения передатчика превышает пороговые поля для возбуждения параметрических неустойчивостей плазмы, а линейное рассеяние играет определяющую роль в верхней ионосфере и магнитосфере Земли, где амплитуда сигнала не столь велика, но значительны масштабы области взаимодействия.

Отмеченная вечерняя перестройка структуры и состава ионосферы позволяет увеличить частоту нижнегибридного резонанса до 20 кГц на высотах пролета спутника. Для излучений с частотой, меньшей частоты нижнегибридного резонанса, зависимость продольной компоненты волнового числа от поперечных компонент представляет собой замкнутую поверхность и распространение волн возможно даже поперек направления геомагнитного поля. Слой высот, доступных для распространения таких излучений, ограничен поверхностью нижнегибридного резонанса.

Оценку характерных пространственных масштабов для волн, распространяющихся поперек магнитного поля, можно получить из выражения

$$k_{\perp} = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon^2 - g^2}{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где $k_{\perp}$ — поперечное волновое число, $k_0 = \omega/c$ — волновое число в вакууме,

$$\varepsilon = 1 - \sum_{\alpha} \frac{\Omega_{\alpha}^2 (\omega + i\nu_{\alpha})}{\omega ((\omega + i\nu_{\alpha})^2 - \omega_{\alpha}^2)},$$

$$ig = -i \sum_{\alpha} \frac{\omega_{\alpha} \Omega_{\alpha}^2}{\omega ((\omega + i\nu_{\alpha})^2 - \omega_{\alpha}^2)}$$

— компоненты тензора диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы, ω — частота волны, Ω_{α} и ω_{α} — плазменная и циклотронная частоты частиц сорта α , ν_{α} — частота столкновений частиц сорта α .

Значения частот столкновений на высотах внешней ионосферы таковы, что при длине волны излучений, меньшей 1 км, наблюдение квазиэлектростатических полей возможно на расстояниях $R < 1000$ км от области возбуждения. На большие расстояния плазменные волны, возбуждаемые сигналами ОНЧ-радиопередатчика, видимо, пришли через магнитосферу и усилились в радиационных поясах.

При распространении сигнала передатчика в магнитосопреженную область магнитная составляющая сигнала (вистлер) уменьшилась на два порядка, а электрическая составляющая в этой области изменилась незначительно. Это служит подтверждением факта усиления квазиэлектростатических (плазменных) волн, соответствующих ветви мелкомасштабных вистлеров, в радиационном поясе в результате резонансного взаимодействия с высокоэнергичными частицами.

Резонансные взаимодействия волновых полей и потоков заряженных частиц в магнитосфере Земли могут привести к генерации магнитосферного циклотронного мазера [12]. Роль активного вещества в этом мазере выполняют частицы радиационных поясов, для которых из-за наличия конуса потерь в пространстве скоростей характерна инверсия населенностей, проявляющаяся в поперечной анизотропии функции распределения. Накачкой частиц является диффузия из радиационных поясов и, если количество таких частиц начинает превышать некий пороговый уровень, волновые поля, присутствующие в магнитосфере, стимулируют возбуждение магнитосферного мазера. Положительная обратная связь обеспечивается частичным отражением волн от областей нарушения условий геометрической оптики (как правило, ионосферных зеркал) для возбуждаемых полей. Порог генерации достигается при балансе усиления волн и потерь. Характерными признаками генерации магнитосферного мазера являются

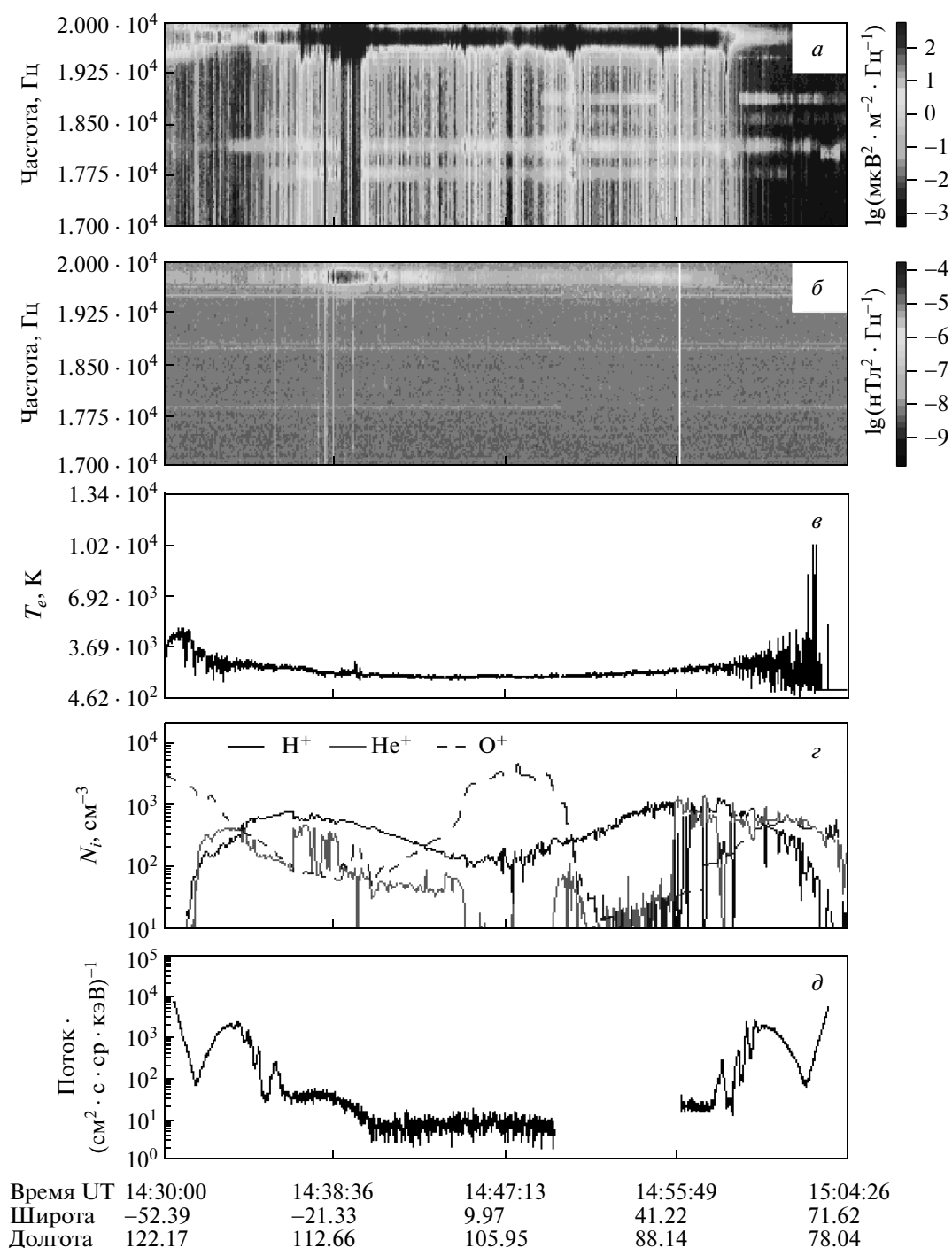


Рис. 3. Электромагнитные и плазменные возмущения, индуцируемые излучением ОНЧ-радиопередатчика NWC в облучаемой области ионосферы для пролета 03.02.2009 г.

заметное по сравнению с фоновым уровнем увеличение интенсивности излучений и высыпания отработанных энергичных частиц.

Наличие квазиэлектростатических колебаний

в окрестности частоты передатчика практически вдоль всей ночной траектории полета спутника доказывает наличие излучений, распространяющихся вдоль геомагнитных силовых линий разных

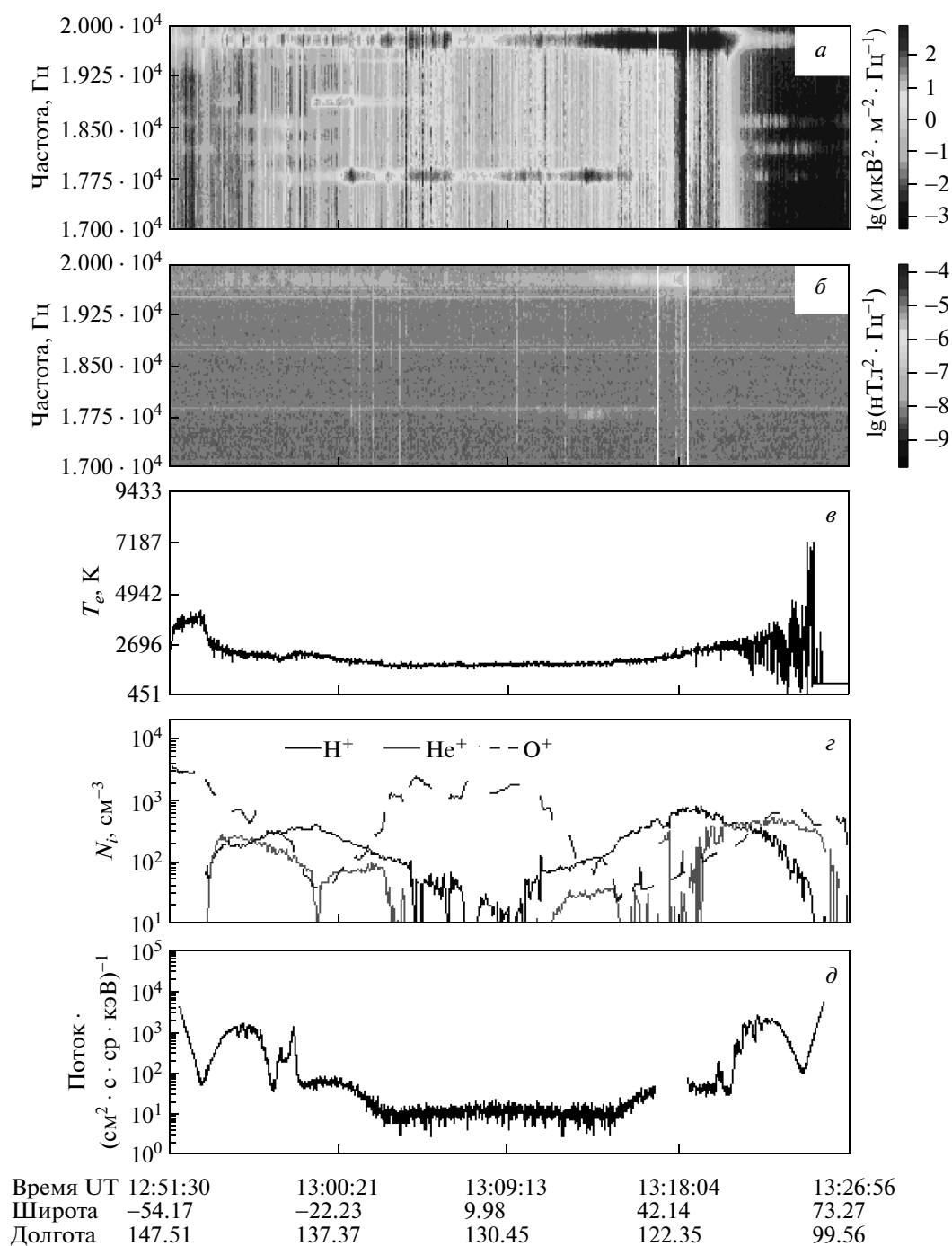


Рис. 4. Электромагнитные и плазменные возмущения, индуцируемые излучением ОНЧ-радиопередатчика NWC в магнитосопреженной области ионосферы

L -оболочек, попавших на них после ряда переотражений от границ магнитосферного резонатора и усиленных в радиационных поясах. Выполнение условий для фазы и амплитуды колебаний при возбуждении генерации в данных условиях оказалось

возможным для квазиэлектростатических (плазменных) волн, по-видимому, из-за наличия большого количества резонансных частиц для волн с такими фазовыми скоростями. Значительные размеры резонатора и неоднородность магнитного поля в

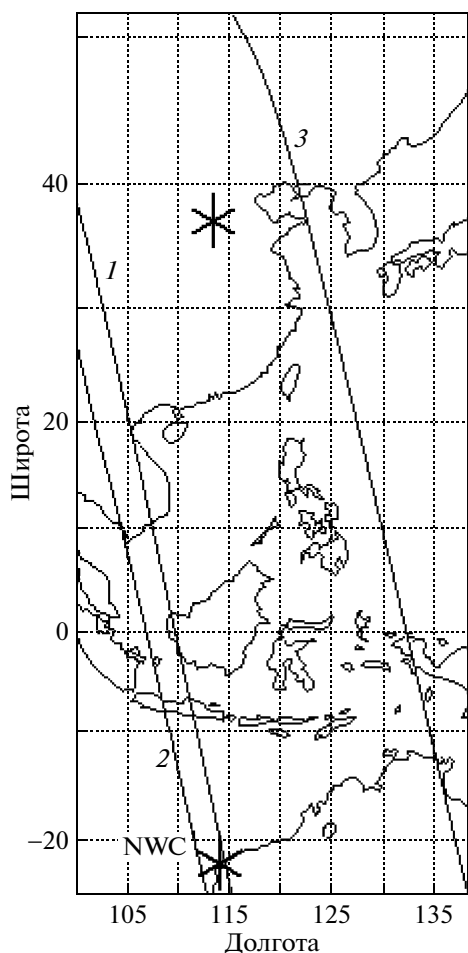


Рис. 5. Траектории пролета спутника (1 — для пролета 22.09.2006 г., 2 и 3 — для 03.02.2009 г.). Звездочками отмечены положения передатчика NWC и его магнитосопреженной области

нем обеспечивают многомодовость возбуждаемых колебаний. Другими словами, есть возможность усиления волн, распространяющихся вдоль разных силовых линий. Приведенные факты, а также высыпания отработанных частиц, позволяют говорить о стимулированной излучением радиопередатчика генерации магнитосферного мазера.

4. ВЫВОДЫ

Представленные в работе данные позволяют утверждать, что связанные ОНЧ-радиопередатчики мощностью порядка 1 МВт формируют в ионосфере искусственные плазменно-волновые каналы, начинающиеся в нижней части ионосферы над источником возмущающего излучения и пронизывающие вдоль силовых линий магнитного поля всю ионосферу и магнитосферу Земли. В области возмущенной

магнитной силовой трубки направление скорости ионов изменяет знак и появляются восходящие (в направлении от Земли) потоки, которые могут влиять на локальные физико-химические процессы.

Распределение плазмы в каналах неоднородно и быстро изменяется. Поэтому ширина спектра квазиэлектростатических излучений, возбуждаемых при рассеянии сигналов передатчика на этих неоднородностях, заметно шире спектра связанного сигнала. Наиболее заметным возмущением, индуцированным излучением передатчика NWC, является генерация квазиэлектростатических (плазменных) волновых процессов на большей части траектории полета, что вместе с данными о наличии высыпаний энергичных частиц позволяет говорить о стимулированной излучением ОНЧ-радиопередатчика генерации магнитосферного мазера.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ (договор № 11.G34.31.0048), программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК №№ П313, 02.740.11.0565) и РФФИ (грант № 12-02-00747-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Stubbe, J. Atmos. Terr. Phys. **58**, 349 (1996).
2. D. M. Wright, J. A. Davies, T. R. Robinson et al., Ann. Geophysicae **18**, 1248 (2000).
3. А. В. Гуревич, УФН **177**, 1145 (2007).
4. В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Г. П. Комраков и др., Письма в ЖЭТФ **88**, 908 (2008).
5. G. M. Milikh, K. Papadopoulos, and H. Shroff, Geophys. Res. Lett. **35**, L17104 (2008).
6. M. Parrot, J. A. Sauvaud, J. J. Berthelier et al., Geophys. Res. Lett. **34**, L11111 (2007).
7. U. S. Inan, H. C. Chang, and R. A. Helliwell, J. Geophys. Res. **89**, 2891 (1984).
8. K. Graf, U. S. Inan, D. Piddychiy et al., J. Geophys. Res. **114**, A07205 (2009).
9. T. F. Bell, K. Graf, U. S. Inan et al., Geophys. Res. Lett. **38**, L11103 (2011).
10. E. V. Mishin, M. J. Starks, G. P. Ginet et al., Geophys. Res. Lett. **37**, L04101 (2010).
11. T. F. Bell and H. D. Ngo, J. Geophys. Res. **95**, 149 (1990).
12. П. А. Беспалов, В. Ю. Трахтенгерц, в кн. *Вопросы теории плазмы*, Атомиздат, Москва (1980), вып. 10, с. 88.