

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ПРИЗЕМНОЙ ПЛАЗМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ НАЗЕМНОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО ПЕРЕДАТЧИКА

*Н.В.Джорджио, М.М.Мозилевский, В.М.Чмырев, Р.А.Ковражкин,
О.А.Молчанов, Ю.И.Гальперин, Ж.М.Боске¹⁾, Ж.Л.Рош²⁾*

Экспериментально обнаружен эффект ускорения ионов H^+ , He^+ и O^+ при воздействии на ионосферную и магнитосферную плазму электромагнитной волны от низкочастотного (НЧ) наземного передатчика.

Ранее были обнаружены эффекты стимулированного высыпания в ионосферу электронов и протонов из магнитосферы Земли под воздействием излучения НЧ передатчика¹⁻⁵. Наш эксперимент, выполненный в рамках советско-французского проекта АРКАД-3, ставился с целью поиска обратных эффектов, а именно, нагрева ионосферных ионов и выноса их в магнитосферу с помощью интенсивных низкочастотных электромагнитных волн от внешнего источника.

В качестве источника излучения использовался советский субавроральный низкочастотный передатчик УПД-8⁶ (географическая широта $\varphi = 64^\circ 24'$ с.ш., географическая долгота $\lambda = 41^\circ 32'$ в.д., параметр Мак-Илвейна $L=4$, излучаемая мощность $W = 300$ кВт), работавший по специальной программе на несущей частоте $f_0 = 19,1$ кГц с амплитудной модуляцией (8 с посылка и 8 с пауза).

Измерения параметров плазмы и электромагнитных волн проводились научной аппаратурой на спутнике ОРЕОЛ-3⁷. В данной работе используются результаты измерений массового состава ионов ($M = 1 \div 32$ ед.) в диапазоне $E/Q = 0,01 \div 3,5$ кэВ/заряд, выполненных приборами ION1 и ION2. При прохождении области вблизи передатчика датчики ION1

¹⁾ Центр исследований космических излучений, Тулуза, Франция.

²⁾ Лаборатория физики и химии космического пространства, Орлеан, Франция.

и 10N2 могли регистрировать ионы с питч-углами $\theta \approx 85^\circ$ и $\theta \approx 145^\circ$ соответственно (θ — угол между направлением скорости частицы и вектором магнитного поля). Для контроля электромагнитных полей в диапазоне частот 10 Гц — 20 кГц использовались измерения прибора ОНЧ-ТВФ.

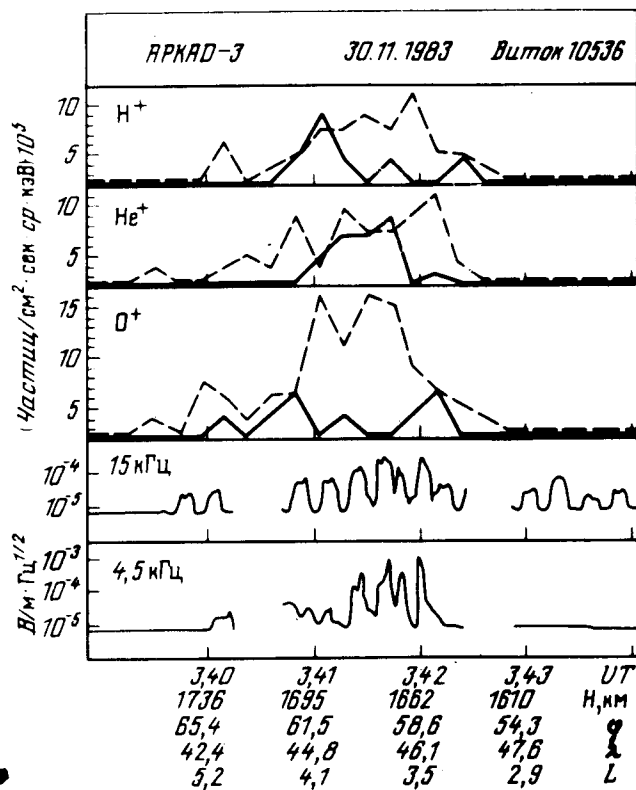


Рис. 1. Дифференциальные потоки ионов H^+ , He^+ , O^+ и электрические поля на частотах 15 кГц и 4,5 кГц, измеренные на витке 10536. На верхних трех графиках пунктирной линией изображены потоки ионов с питч-углами $\theta \approx 85^\circ$, а сплошной линией с $\theta \approx 145^\circ$. Разрывы кривых на двух нижних графиках связаны с отсутствием информации из-за бортовой калибровки прибора ОНЧ-ТВФ. UT — мировое время, H — высота спутника; φ и λ — географические широта и долгота проекции орбиты спутника, L — параметр Мак-Илвейна. Интенсивности потоков (верхние три графика) приведены в линейном масштабе, а электрические поля — в логарифмическом.

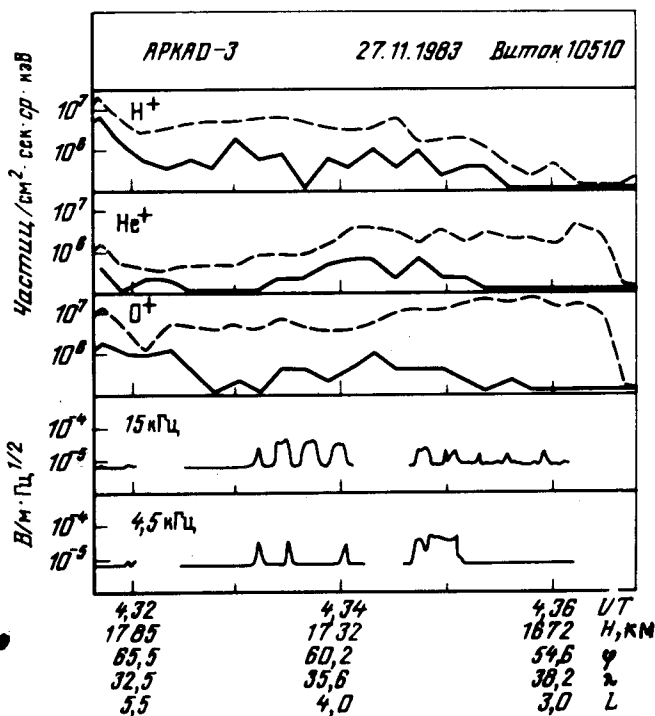


Рис. 2. Измерения, аналогичные рис. 1, выполненные на витке 10510. Потоки частиц представлены в логарифмическом масштабе

На рис. 1 приведены потоки ионов H^+ , He^+ и O^+ с энергиями $250 \div 330$ эВ и амплитуды электрической компоненты электромагнитного поля, перпендикулярной внешнему магнитному полю, на частотах 15 кГц и 4,5 кГц. Амплитуды сигнала передатчика определялись по широкополосному фильтру с центральной частотой 15 кГц. Поскольку измерения проводились при относительно слабой геомагнитной активности (индекс $D_{st} = -10$ нТ), зона естественных авроральных высыпаний находилась на более высоких широтах и на рис. 1 не приведена. Из рис. 1 видно, что среднеширотное возрастание потоков ионов примерно на порядок над уровнем фона происходит в зоне регистрации сигналов передатчика. Одновременно с этим появляется излучение на частотах $\sim 4,5$ кГц, лежащих вблизи локальной частоты нижнего гибридного резонанса, коррелированное с 8 с — посылками передатчика.

На витке 10510 (рис. 2) измерения проводились при большей геомагнитной активности ($D_{st} = -30$ нТ). Поэтому зона естественных высыпаний, как видно из рис. 2, сместилась на меньшие L -оболочки и частично перекрывалась с зоной воздействия сигналов передатчика. На этом витке, как и в предыдущем случае, в зоне передатчика наблюдается значительное возрастание квазипоперечных и направленных вверх ионных потоков (до $10^6 - 10^7$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ кэВ $^{-1}$), особенно отчетливо выраженное для ионов He^+ . Следует отметить, что если при спокойных геомагнитных условиях интенсивности потоков ионов с $\theta \approx 85^\circ$ и $\theta \approx 145^\circ$ были близки, то при возмущенных условиях эти потоки отличаются в несколько раз. Другим отличием является смещение низкоширотной границы потоков ионов с $\theta \approx 85^\circ$ на меньшие L -оболочки. На рис. 3 показано географическое положение областей, в которых наблюдались аномальные потоки ионов из ионосферы в магнитосферу ($\theta \approx 145^\circ$) на 5 витках спутника ОРЕОЛ-3. Звездочкой на рисунке отмечено положение передатчика, а пунктирной линией — оболочка $L = 4$. Как и в предыдущих экспериментах^{3, 5}, область "влияния" передатчика ограничена зоной $5-7^\circ$ по широте и смещена к экватору от L -оболочки передатчика.

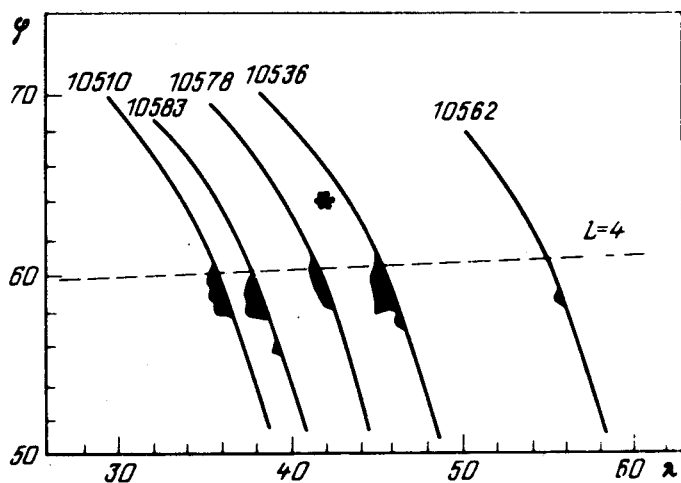


Рис. 3. Схема расположения проекций витков спутника, проходивших вблизи от передатчика, на Землю. На проекциях витков изображены потоки иона He^+ с $\theta \approx 145^\circ$ (потоки снизу). Цифры, стоящие рядом с кривыми — номера орбит спутника. Пунктирная линия — пересечение спутником L -оболочки, на которой находится передатчик. φ и λ — географические широта и долгота

Таким образом из представленных выше экспериментальных данных следует, что интенсивные электромагнитные волны от наземного ОНЧ передатчика стимулируют развитие следующих физических процессов в среднеширотной ионосфере и магнитосфере Земли: 1) ускорение до энергий порядка или больше 300 эВ и вынос в магнитосферу ионосферных ионов O^+ , He^+ и H^+ ; 2) раскачку интенсивных КНЧ/ОНЧ шумов в области наблюдения квазипоперечных ионных потоков.

Из-за большой фазовой скорости свистовых волн их взаимодействие с надтепловыми ионами ($E \lesssim 1$ кэВ) в верхней ионосфере не эффективно. Поэтому для объяснения полученных результатов представляется разумным рассмотреть двухступенчатый процесс: нелинейную трансформацию свистовой волны, излучаемой наземным НЧ передатчиком, в другие моды плазменных волн, а затем взаимодействие этих вторичных волн с ионосферными ионами. Наиболее эффективно в верхней ионосфере протекают два нелинейных процесса с участием свистовых волн: индуцированное рассеяние свистов в низкочастотные плазменные (или нижегибридные)

волны на тепловых ионах и распад свистов на низкочастотные плазменные и электростатические ионно-циклотронные волны ^{8,9}.

На важность процессов нелинейного индуцированного рассеяния для нагрева плазмы, в том числе ионосферной, указывалось в ^{10, 11}. Высокая эффективность нижегибридных и ионно-циклотронных волн для ускорения ионов поперек внешнего магнитного поля показана в ряде работ, относящихся как к авроральной ¹²⁻¹⁴, так и лабораторной ¹⁵⁻¹⁶ плазме.

Авторы выражают признательность Ж.Ж.Бертелье за подготовку эксперимента ОНЧ-ТВФ, а также Т.А.Востриковой и И.Г.Орловой за помощь в оформлении работы.

Литература

1. *Imhof W.L., Reagan S.B., Voss H.D. et al.* Geophys. Res. Lett., 1983, 10, 615.
2. *Жулин И.А., Ляхов С.Б., Майоров А.Д. и др.* ДАН, 1976, 230, 1073.
3. *Ковражкин Р.А., Могилевский М.М., Молчанов О.А. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 193.
4. *Koons H.C.* Geophys. Res. Lett., 1975, 2, 281.
5. *Ковражкин Р.А., Могилевский М.М., Боске Ж.М. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, 332.
6. Эталонные сигналы частоты и времени, Беллунтьез В-05-1982, М.: Изд. стандартов, 1981.
7. *Ann. Geophys.*, 1982, 38, 543.
8. *Trakhtengertz V.Yu.* Planet. Space Sci., 1973, 21, 359.
9. *Грач С.М.* Изв. вузов, Радиофизика, 1975, 18, 1627.
10. *Литвак А.Г., Трахтенгерц В.Ю.* ЖЭТФ, 1971, 60, 1702.
11. *Литвак А.Г., Трахтенгерц В.Ю.* ЖЭТФ, 1972, 61, 228.
12. *Lysak R.L., Hadson M.K., Temerin M.* J. Geophys. Res., 1980, 85, 678.
13. *Chang T., Coppi B.* Geophys. Res. Lett., 1981, 8, 1253.
14. *Retterer J.M., Chang T., Jaspere J.R.* J. Geophys. Res., 1986, 91, 1609.
15. *Kindel J.M., Okuda H., Dawson J.M.* Phys. Rev. Lett., 1972, 29, 995.
16. *Chu C., Dawson J.M.* Phys. Fluids, 1976, 19, 981.

Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн АН СССР

Поступила в редакцию
1 сентября 1987 г.

Институт космических исследований АН СССР