

СВЯЗЬ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК
ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА ПО
ДАНЫМ СПУТНИКА ИНТЕРКОСМОС-14

Я.И. Лихтер, Г.Л. Гдалевич, В.В. Афонин,
В.И. Ларкина, Ю.М. Михайлов, В.Д. Озеров
(Москва, СССР)
К.Б. Серафимов, Л.Г. Банков, Ц.П. Дачев,
Н.С. Трендафилов, С.К. Чапканов
(София, БНР)
П.Триска, Ф.Иржичек, Я.Шмиллауер
(Прага, ЧССР)

На спутнике "Интеркосмос-14" (апогей 1700 км, перигей 340 км, наклонение 74°) были проведены измерения суммарной концентрации ионов, двух значений электронной температуры, соответствующей движению электронов во взаимно перпендикулярных направлениях и четырех компонент поля КНЧ и ОНЧ излучений. Приводятся примеры вариаций концентрации плазмы, электронной температуры и двух взаимно перпендикулярных компонент магнитного и электрического поля КНЧ и ОНЧ излучений при прохождении спутника через область главного ионосферного провала и высокоширотной ионосферы. В условиях провала создаются благоприятные условия для возбуждения шумов нижнего гибридного резонанса. Эти шумы регистрируются преимущественно на электрическую антенну. Нижняя частота обрезания коррелирует с электронной концентрацией плазмы в провале. Вычисление эффективной массы ионов $M_{эфф}$ в зоне провала показывает, что $M_{эфф}$ как правило, возрастает вблизи провала. В минимуме концентрации амплитуда электрического и магнитного полей излучений на частотах меньших $\omega_{нгр}$ увеличивается на порядок величины или более. Флуктуации температуры плазмы в высокоширотной зоне неоднородностей происходят в противофазе с флуктуациями концентрации. Связь флуктуаций амплитуды электрического поля излучений с флуктуациями T_e и n_e носит сложный характер. Рассмотрение механизмов волновой неустойчивости указывает на возможность локального возбуждения КНЧ волн в провале и примыкающей к нему зоне неоднородностей.

1. Введение

По данным спутника "Интеркосмос-10" была отмечена тесная связь между изменениями спектра ОНЧ-шумов и концентрацией и температурой электронов в области инвариантных широт $30 - 70^\circ / \text{I}$. Такая корреляция позволила предположить, что нижняя граничная частота ОНЧ-шума совпадает с нижней гибридной частотой и в этой области происходит возбуждение шумов нижнего гибридного резонанса на высотах спутника $/ 2 /$. На спутнике "Интеркосмос-14" были проведены измерения суммарной концентрации ионов, двух значений электронной температуры, соответствующих движению электронов во взаимно перпендикулярных направлениях и четырех компонент поля КНЧ и ОНЧ излучений.

В настоящей статье будут проанализированы волновые явления в КНЧ и ОНЧ диапазонах, наблюдавшиеся при прохождении спутника "Интеркосмос-14" через область среднеширотного провала и примыкающие к нему районы внешней ионосферы.

Спутник "Интеркосмос-14" был выведен 11 декабря 1975г. на орбиту с параметрами: высоты апогея 1700 км и перигея 340 км, при наклонении 74° .

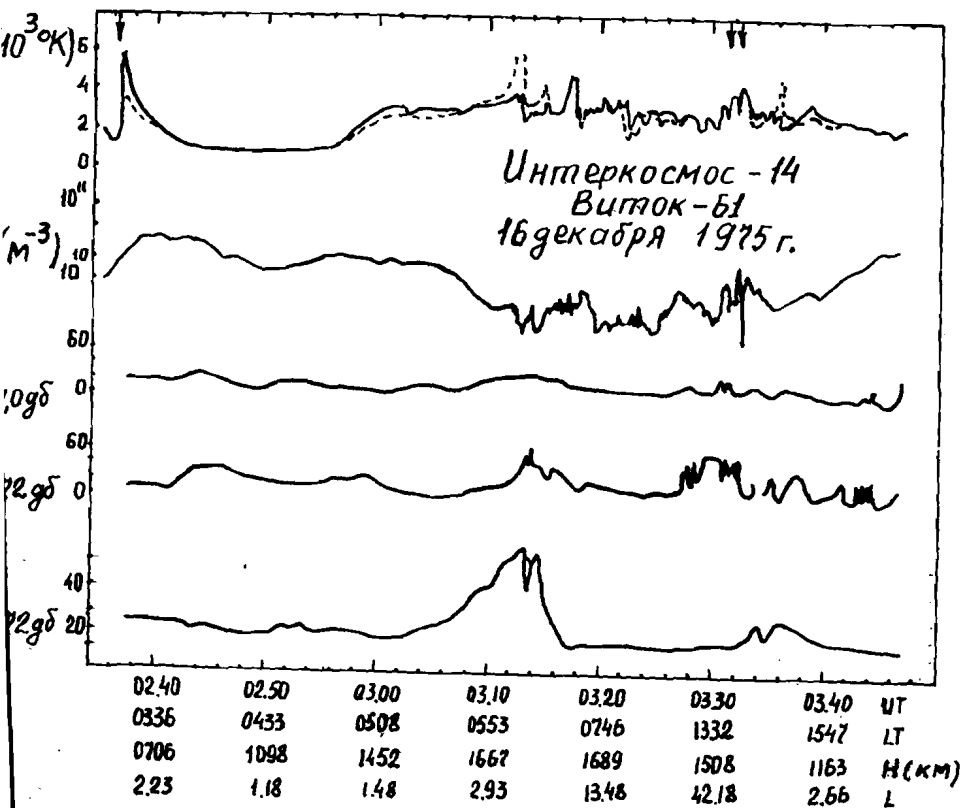
2. Экспериментальные результаты

На фиг.1 представлены типичные примеры изменения вдоль орбиты электронной температуры (T_e), концентрации положительных ионов (n_i) и амплитуды ОНЧ излучения электрической компоненты на $f = 4,0$ кГц ($|e_y| 4$), амплитуды КНЧ-излучения на частоте 0,72 кГц электрической ($|e_x| 0,72$) и магнитной ($|b_x| 0,72$) компонент, наблюдавшиеся 16 декабря 1975г. На оси абсцисс указано мировое время (ИТ), местное время ($\angle T$), высота (Асс, км) и \angle - оболочка.

Как видно на фиг.1, регистрация данных на спутнике на 61 витке началась в северной полусфере в ночное время, когда спутник выходил из области среднеширотного провала (см. кривую n_i на фиг.1). Внезапное увеличение T_e до величин $6 \cdot 10^3$ К наблюдалось одновременно с увеличением n_i . Этот максимум находится в области свечения красных дуг $/ 3 /$. Амплитуда излучений на 4,0 и 0,72 кГц не изменяется заметно в этой области. Однако, одновременная регистрация шума в широкой полосе частот показала увеличение интенсивности ОНЧ-излучений в интервале 02 36 30 - 02 36 50 ИТ в полосе частот выше 6,0 кГц (см. фиг.2 в $/ 4 /$). На фиг.1 этот момент отмечен стрелкой "↓".

Такое увеличение интенсивности ОНЧ-шумов регистрировалось только на одной из двух электрических компонент. Отсутствие магнитной компоненты и линейная поляризация электрической компоненты поля, а также резкое обрезание спектра шума снизу дает основание заключить, что это шумы нижнего гибридного резонанса. В области экватора n_i уменьшается, что соответствует данным спутника "Интеркосмос-2" для высот более 900 км и ночных условий $/ 5 /$. Увеличение T_e , которое начинается в 02 56 ИТ, связано с пересечением спутником терминатора и выходом его в освещенную ионосферу. В 03 05 ИТ спутник "Интеркосмос-14" дос-

среднеширотного провала в южной полусфере - высота и мест- время позволяют предположить, что это провал легких ионов.



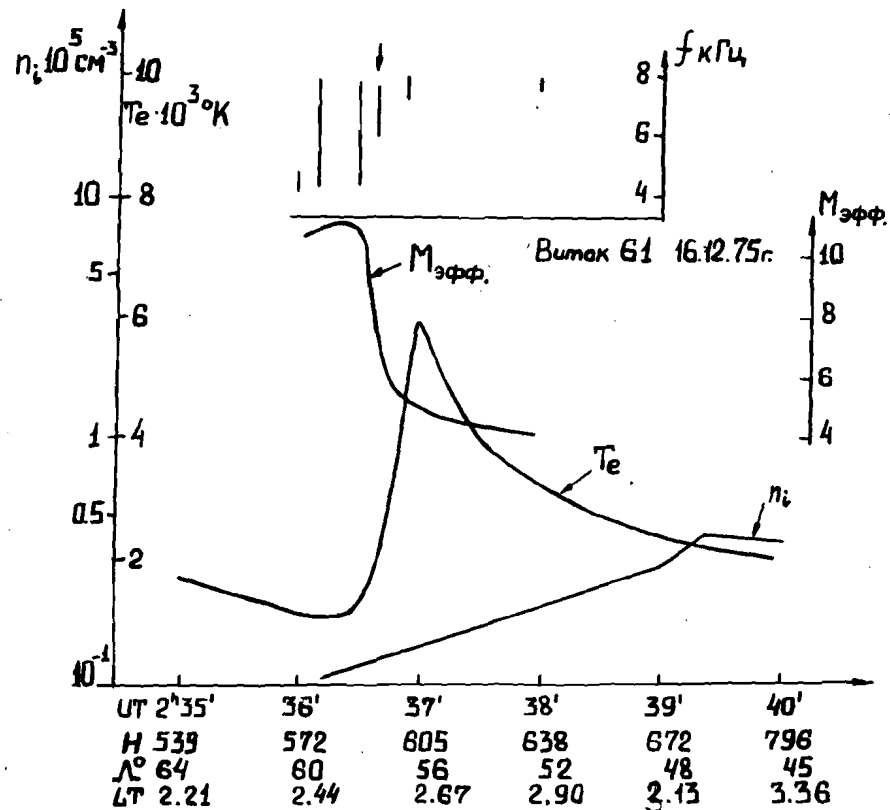
Фиг. 1

видно из Фиг. 1 в провале увеличивается амплитуда излучений, особенно на 0,72 кГц. Увеличение T_e наблюдалось в узкой зоне минимума n_i . Одновременно наблюдалась анизотропия температуры. Далее спутник пролетал высокоширотную зону неоднородной n_i . На $L \approx 4,0$ наблюдалось авроральное увеличение

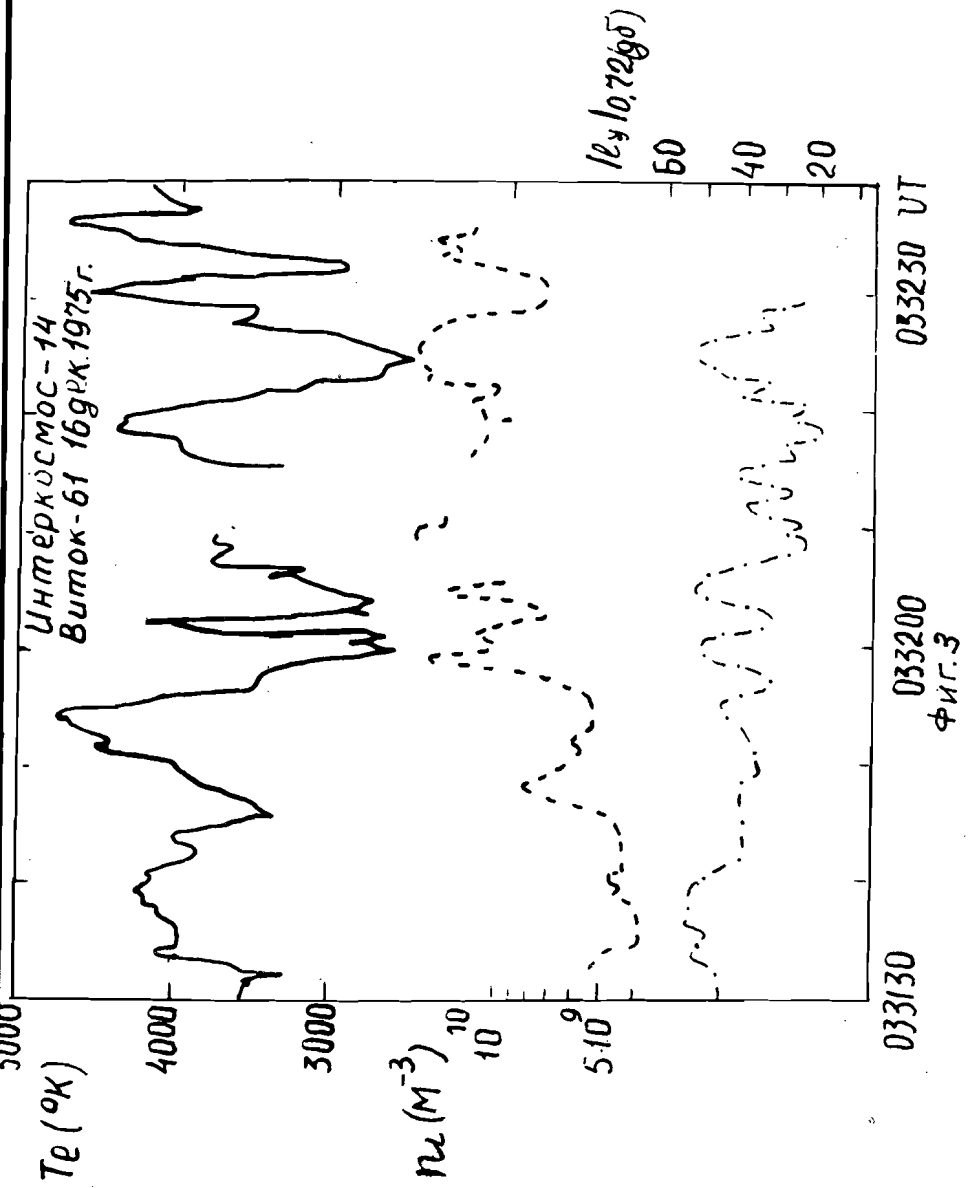
флуктуации n_i сопровождалась флуктуациями T_e . Флуктуации наблюдались и в амплитуде КНЧ-излучений, особенно на высотной стороне провала (при $L = 5,2$ флуктуации 0,72 и 1,5х/0,72). Затем спутник пересек полярную шапку (13), в которой наблюдались минимальные значения n_i и малые амплитуды электрических и магнитных компонент излучений. В 03 31 - 03 33 ИТ спутник вышел из полярной шапки и

наблюдалось увеличение интенсивности электрической компоненты излучения на 4,0 и 0,72 кГц в момент локального минимума n_i . Еще один всплеск амплитуды электрической компоненты излучений наблюдался в 03 44 - 03 46 ИТ, когда спутник находился на экваториальной стороне провала и n_i увеличивалось. Амплитуда магнитной компоненты поля в этих случаях не изменялась и была сравнительно малой. Это свидетельствует об электростатической природе КНЧ излучений.

На Фиг. 2 приведены значения n_i , T_e , спектр ОНЧ-шумов и значения эффективной массы ионов. Последняя величина вычислялась исходя из того, что спектр шумов был ограничен снизу нижней гибридной частотой плазмы (см. выше) по методу, изложенному в работе / 2 /. Фиг. 2 относится к витку 61 (соответствующий момент отмечен " ↓ " на Фиг. 1). Из Фиг. 2 видно, что в провале $M_{эфф}$ растет и на высотах ~ 600 км изменяется от 4 до 10. Этот результат подтверждает высказанное выше предположение о том, что на высотах ~ 1700 км в южной полусфере наблюдался провал легких ионов.



Фиг. 2



На фиг.3 приведена тонкая структура флуктуирующей n_i , T_e и $|e_{y1}| 0,72$ для момента выхода спутника из полярной шапки и нахождения его в области среднеширотного провала (на фиг.1 этот промежуток отмечен двумя стрелками "↓↑"). Из фиг.3 следует, что флуктуации n_i и T_e находятся в противофазе и, возможно, что мелкие неоднородности n_i с масштабом ≈ 10 км поддерживаются соответствующими изменениями T_e (в предположении постоянства давления плазмы). Из фиг.3 видно также, что в интервале 03 32 00 - 03 32 30 ИТ наблюдалась положительная корреляция между n_i и $|e_{y1}| 0,72$. Однако, из фиг.3 можно заключить также, что более медленные изменения n_i и $|e_{y1}| 0,72$ происходят в противофазе.

3. Обсуждение результатов

Прежде чем перейти к обсуждению, резюмируем полученные результаты:

- а) В области $50^\circ < \Lambda < 70^\circ$ ночью на высотах > 600 км наблюдаются шумы нижнего гибридного резонанса (см. фиг.2 и / 1,2 /).
- б) Днем на больших высотах (~ 1700 км) в области среднеширотного провала амплитуда электрического и магнитного полей КНЧ-излучений (0,72 кГц) увеличивается на порядок величины или более. В ОНЧ диапазоне (4,0 кГц) не обнаруживается столь значительный рост амплитуды.
- в) В высокоширотной зоне неоднородностей обнаруживаются локализованные всплески амплитуды электрической компоненты волн при сравнительно малом и неменяющемся уровне магнитной компоненты.
- г) Флуктуации n_i в зоне неоднородностей находятся в противофазе с флуктуациями T_e , и сложной зависимости с флуктуациями амплитуды электрической компоненты КНЧ-волн (при неизменном уровне магнитной компоненты).

Для истолкования обнаруженных особенностей, по-видимому, целесообразно рассмотреть возможность возбуждения низкочастотных излучений во внешней ионосфере в области среднеширотного провала и в зоне неоднородностей. Действительно, увеличение амплитуды излучений более чем на 40 дБ в минимуме n_i нельзя объяснить фокусировкой волн в процессе их распространения в неоднородной ионосфере. (Подобный эффект не был обнаружен при расчетах распространения волн с учетом неоднородностей n_i и кинетического усиления / 6 /). Всплески электрической компоненты КНЧ-волн также указывают на большую вероятность локального возбуждения волн. При обсуждении вопроса о возбуждении низкочастотных волн в области провала n_i следует принять во внимание, что полярная граница провала очень резка (большой градиент n_i) и соответствует ночью диффузной зоне авроральных сияний, а днем практически совпадает с началом клефта (каспа). Таким образом, в области непосредственно примыкающей к провалу n_i наблюдаются потоки электронов типа обращенного $\nabla / 7,8 /$.

Рассмотрим два возможных механизма возбуждения низкочастотных волн в этой области внешней ионосферы: а) черенковское возбуждение волн; и б) градиентно-дрейфовый механизм.

а) Спутниковые данные показали, что максимум в энергетическом спектре потоков электронов в этих широтах приходится на ~ 3 кэВ / 7 /. Такие потоки могут вызвать черенковское возбуждение волн. Частота возбуждаемых волн дается выражением:

$$\omega = \omega_{ce} \cos \theta \left(\frac{u}{c} \right)^2 \left(\frac{\omega_{ce}}{\omega_{ce}} \right)^2 \quad (I)$$

Здесь c - скорость света, ω_{ce} - гирочастота электронов, ω_{ce} - плазменная частота, u - параллельная магнитному полю скорость электронов. При $\epsilon \sim 3$ кэВ $(u/c)^2 \sim 10^{-2}$, $\omega_{ce} < \omega_{ce}$ в зоне провала и в минимуме концентрации $\omega_{ce}/\omega_{ce} \approx (4-8) \cdot 10^{-2}$. Так, что низшее значение ω достигается в минимуме концентрации плазмы. Известно, что при черенковском возбуждении генерируются волны с большим θ . Следовательно, из (I) может получиться резонансное условие для частоты $f \approx 1$ кГц. Инкремент черенковской неустойчивости в области провала может быть положительным уже при небольшой концентрации электронов в потоке / 9 /. Так как инкремент черенковской неустойчивости $\gamma \sim (n_1/n_0)^{1/2}$, то в минимуме он особенно велик (n_1 - концентрация частиц в потоке, n_0 - концентрация плазмы).

Таким образом, из оценок величины инкремента и резонансного условия (I) можно заключить, что частота 0,72 кГц, амплитуда которой, как обнаружено в эксперименте (фиг.1), особенно сильно увеличивается в провале, легче всего должна возбуждаться в минимуме концентрации плазмы.

Можно ожидать, что возбуждение будет происходить наиболее эффективно на высотах ≈ 1000 км, где поглощение из-за соударений пренебрежимо мало. Следовательно, упомянутые выше различия явлений на малых высотах (ночью) и на больших высотах (днем) можно преимущественно приписать различию высот, а не времени суток.

В зоне неоднородностей концентрации, примыкающей к полярной границе провала, возбуждение волн может происходить еще эффективнее, так как потоки электронов здесь интенсивнее. В работах [10,11] специально рассматривается потоковая (черенковская) неустойчивость в авроральной магнитосфере и показано, что возбуждение волн с большим значением угла θ . Т.е. волны, имеющие выраженный электростатический характер. В процессе распространения из-за рефракции в неоднородной ионосфере угол θ увеличивается и в поле волн возникает также магнитная компонента заметной интенсивности.

б) Для интерпретации волновых явлений, наблюдавшихся в ионосферном провале и полярнее его, надо также учесть сильно выраженную неоднородность плазмы. В неоднородной плазме могут возникать новые моды волн в результате межволновых взаимодействий (см. например / 9 /), а также дрейфово-градиентной неустойчивости.

В / 12 / рассмотрен вопрос о градиентно-дрейфовой неста-

бильности и возбуждаемом диапазоне частот. Показано, что при $v_d/v_{Te} > 0,5$ возбуждаются шумы нижней гибридной частоты, а если $0,02 \leq v_d/v_{Te} \leq 0,5$ в предположении, что $T_e \approx T_i$ и что в плазме имеются ионы O^+ или He^+ , то преимущественно возбуждаются резонансные ионно-циклотронные моды волн. По мере уменьшения отношения v_d/v_{Te} наибольшей интенсивностью обладают меньшие гармоники ионно-циклотронных волн. Оценка по фиг.3 дрейфовой скорости из градиента давления плазмы приводит к $v_d/v_{Te} \approx 0,01$. Это дает основания полагать, что в условиях эксперимента, частоты близкие к протонной циклотронной частоте (~ 1000 Гц) могли возбуждаться в результате градиентно-дрейфовой неустойчивости. Мы наблюдали наибольшую амплитуду волн на частоте 0,72 кГц, достаточно близкой к протонной гирочастоте.

В эксперименте на "Интеркосмос-14" мы не могли исследовать подробно неоднородности концентрации и температуры плазмы разных пространственных масштабов. В работах / 14-16 / анализируются неоднородности разных масштабов на высотах внешней ионосферы в области ионосферного провала. Можно полагать, что в результате дробления крупных неоднородностей на более мелкие / 16 / возрастает относительный градиент концентрации. Это должно способствовать нарастанию дрейфово-градиентной неустойчивости. Изменения v_d могут приводить к смене возбуждаемых модов волн в пределах частот от ионной гирочастоты до нижней гибридной частоты.

Фиг.3 свидетельствует о сложном характере возбуждения волн в результате дрейфовой неустойчивости. Это говорит также о сложной структуре неоднородностей и связанных с ними градиентов концентрации.

4. Заключение

В настоящей работе продолжено начатое в (I) исследование структурных свойств плазмы в среднеширотном провале и их связи с низкочастотными излучениями.

В дополнение к исследованным в / 1,2,4 / шумам нижней гибридной частоты показано, что в минимуме концентрации резко увеличивается амплитуда КНЧ-излучений ($f = 0,72$ кГц). Отмечается, что флуктуации амплитуды КНЧ-излучений в примыкающей к ионосферному провалу зоне неоднородностей сложным образом зависят от флуктуации концентрации и температуры плазмы.

Могут быть сделаны следующие выводы:

1. Наблюдаемые свойства излучений в провале и примыкающих к нему областях внешней ионосферы (значительный рост амплитуды, наличие во многих случаях преимущественно электростатических модов волн, связь частоты обрезания ОНЧ шумов с электронной плотностью и корреляция флуктуации амплитуды волн и концентрации плазмы) указывают на возможность локального возбуждения низкочастотных излучений.

2. Обсуждение черенковского и градиентно-дрейфowego возбуждения волн в этих областях внешней ионосферы приводят к заключению о вероятности локальной генерации излучений.

Литература

- D. Bettac, G.L. Gdalevich, V.F. Gubsky, A.S. Debabov, F. Jiricek, I.N. Kapustin, S.I. Klimov, H. Lemann, Ja.I. Likhter, Yu.M. Mikhailov, S.P. Savin, E.E. Titova and P. Triska. Space Research XVI, 575, (1976).
- Г.Л.Гдалевич, В.Ф.Губский, Я.И.Лихтер, Ю.М.Михайлов, Е.Е.Титова, Ф.Иржичек, П.Триска, А.Бест, Х.Р.Леман, Р.Тройман, К.У.Вагнер, Ю.Рустенбах, Д.Веттак, П.Ликфельдт. В сб. "Труды международного симпозиума по физике ионосферы и магнитосферы Земли и солнечного ветра", изд-во Словацкой АН, ред. Г.Л.Гдалевич, С.Пинтер, Гурбаново, ЧССР, 1977, т.1, с.166.
- J.M. Cornwall, F.V. Coroniti and R.M. Thorne. J. Geophys. Res., 76, № 19, 4428, (1971).
- Ja.I. Likhter, V.I. Larkina, Yu.M. Mikhailov, V.V. Afonin, G.L. Gdalevich, K.B. Serafimov, L.G. Bankov, Ts.P. Dachev, N.S. Trendafilov, F. Jiricek, J. Smilauer, P. Triska and J. Voita. Space Research XIX, 339, (1979).
- Г.Л.Гдалевич, Б.Н.Горожанкин, Д.Самарджиев, К.Б.Серафимов, И.Кутиев. Космические исследования, II, вып.2, 245, (1973).
- А.Е.Резников. Амплитудные вариации ОНЧ-волн в ионосфере и магнитосфере Земли, кандидатская диссертация, Москва, ИЗМИРАН, 1978.
- Ching-I. Meng. Space Science Reviews, 22, № 3, 223 (1978)
- L.A. Frank and K.L. Ackerson. J. Geophys. Res., 76, № 16, 3612 (1971).
- Электродинамика плазмы. Ред. А.И.Ахиезер. М., "Наука", 1974.
- I. Kimura. Report of Ionosph. and Space Res. in Japan, 22, № 4, 360 (1971).
- D.W. Swift and J.R. Kan. J. Geophys. Res., 80, № 7, 985 (1975)
- J.P. Freidberg and R.A. Gerwin. Phys. Fluids, 20, № 8, 1311 (1977).
- S. Basu. J. Geophys. Res., 83, № 1, 182 (1978).
- V.D. Ozerov. Space Research XVI, 479 (1976).
- В.Д.Озеров. В сб. "Труды международного симпозиума по физике ионосферы и магнитосферы Земли и солнечного ветра", изд-во Словацкой АН, ред Г.Л.Гдалевич, С.Пинтер, Гурбаново, ЧССР, 1977, т.2, с.243.
- P.L. Dyson, J.P. McClure and W.B. Hanson. J. Geophys. Res., 79, № 10, 1497 (1974).

The coupling of low frequency emission and plasma characteristics in the region of ionospheric trough as observed on the Intercosmos - 14 satellite.

J.I. Likhter, G.L. Gdalevich, V.V. Afonin, V.I. Larkina, I.M. Mikhailov, V.D. Ozerov, Moscow, USSR
K.B. Serafimov, L.G. Bankov, C.P. Dachev, N.S. Trendafilov, S.K. Chapkanov
Sofia, Bulgaria
P. Triska, F. Irzicek, J. Smilauer
Praha, Czechoslovakia

The following measurements have been made on the Intercosmos - 14 satellite / apogee 1700 km, perigee 340 km, inclination 74° / : total ion concentration, both electron temperature values, i.e. perpendicular to each other, as well as four components of the ELF and VLF electromagnetic emission fields. Examples are given of variation in plasma concentration, electron temperature, two perpendicular components of the electric and magnetic field during the satellite's passage through the main ionospheric trough region, as well as high-latitude ionosphere. In the trough region favourable conditions for the generation of lower hybrid resonance emission are observed. The wave instability mechanism indicates the possibility of the ELF wave generation in the trough region and its inhomogeneous surrounding.