

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРА-КРАЙНЕ-ОЧЕНЬ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Ю. М. Михайлов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Представлены наиболее важные результаты исследования особенностей низкочастотных волновых процессов в околоземном космическом пространстве, полученные в проектах «Интеркосмос-24», «Интеркосмос-25», «ВЕГА-1», «ВЕГА-2», «Джотто» (GIOTTO).

Ключевые слова: спутники, «Интеркосмос-24», «Интеркосмос-25», «ВЕГА-1», «ВЕГА-2», УНЧ-КНЧ-ОНЧ- электромагнитные волны.

ВВЕДЕНИЕ

В период с 1986 г. лаборатория низкочастотных излучений и электромагнитной совместимости принимала активное участие в космических проектах: «Интеркосмос-24» (1989–1992), «Интеркосмос-25» (1991–1993), «Компас» (2001–2002), «ВЕГА-1» и «ВЕГА-2» (1986) с использованием УНЧ-ОНЧ-бортовой аппаратуры (частоты $f < 30$ Гц — УНЧ (ультранизкие частоты; ULF — ultra-low-frequency); $f = 30$ Гц — 3 кГц — КНЧ (крайне низкие частоты; ELF — extremely-low-frequency); $f = 3...30$ кГц — ОНЧ (очень низкие частоты; VLF — very low frequency)). Ниже приводятся наиболее важные результаты исследования особенностей низкочастотных волновых процессов в околоземном космическом пространстве (ОКП), полученные в этих проектах коллективом лаборатории в кооперации с международными космическими центрами.

1. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА СПУТНИКЕ «ИНТЕРКОСМОС-24»

Искусственный спутник Земли (ИСЗ) «Интеркосмос-24» («Активный») был выведен на орбиту 28 сентября 1989 г. с апогеем 2500 км, перигеем 500 км, наклоном 82,5° и периодом обращения 116 мин. На борту этого спутника был установлен прибор НВК-ОНЧ (низкочастотный волновой комплекс очень низких частот), позволявший регистрировать три магнитные и две электрические компоненты поля в полосе частот $20...20 \cdot 10^3$ Гц, т.е. волновую форму сигнала, которая транслировалась на Землю по УКВ-радиолинии (ультракороткие волны; VHF) в приёмные пункты ИЗМИРАН, Апатиты, Панска Вес (ЧССР — Чехословацкая Социалистическая Республика).

Михайлов Юрий Михайлович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, профессор, yumikh@izmiran.ru



Рис. 1. ИСЗ «Интеркосмос-24»: 1 — антенна прибора для возбуждения плазмы (ПВП); 2 — двойной зонд для измерения компоненты поля E_x с помощью прибора НВК-ОНЧ; 3 — круговая магнитная антенна

В режиме запоминания прибор НВК-ОНЧ работал как спектроанализатор, содержащий в себе 12 фильтров на частотах 8; 20; 33; 50; 75; 225; 430; 970 Гц, 9,6 и 15 кГц. Сигналы с выхода этих фильтров также транслировались на Землю по УКВ-радиолинии. Кроме того, были установлены приборы для возбуждения плазмы (ПВП) и для излучения ОНЧ-волн (генератор с рамочной магнитной антенной на частоте $9,6 \pm 0,7$ кГц).

На рис. 1 показан общий вид спутника, ось Z совпадает с направлением вертикальной оси аппарата. Рамочная антенна располагалась в плоскости XZ (цифра 3) [Гдалевич и др., 2003]. Антенна прибора ПВП изображена в условном масштабе и обозначена цифрой 1. В качестве приёмных антенн этого комплекса использовалась следующая конфигурация: X - и Z -компоненты электрического поля в ОНЧ-КНЧ-диапазонах измерялись приёмником НВК-ОНЧ [Михайлов и др., 1994] (на рисунке не указаны), а E_y -компонента измерялась приёмником ОНЧ-2 [Klos et al., 1998] (цифра 2 на рисунке). Прибор ОНЧ-2 представлял собой 12-канальный спектроанализатор в полосе частот от 8 до $20 \cdot 10^3$ Гц. В качестве его антенны использовался двойной зонд, ориентированный вдоль оси Y . Прибор был синхронизован с ПВП и позволял измерять отклик плазмы с временным разрешением до 10 мс [Гдалевич и др., 2003].

1.1. Частота нижнего гибридного резонанса плазмы и волновая диагностика её параметров

Наиболее характерным видом ОНЧ-излучений в магнитоактивной приземной плазме являются шумы нижнегибридного резонанса (НГР), частота которого выражается известной формулой [Mikhailov et al., 1995]:

$$f_{\text{НГР}} = \frac{f_{0e} f_{B_e}}{\sqrt{m_{\text{эф}} (f_{0e}^2 + f_{B_e}^2)}} \sqrt{\frac{m_e}{m_p}}, \quad (1)$$

где f_{0e} и f_{Be} — плазменная и гирочастота электронов; m_e и m_p — масса электронов и протонов ($m_p/m_e = 1836$); $m_{эф}$ — эффективная масса ионов

$$\frac{1}{m_{эф}} = \sum_i \frac{a_i}{m_p/m_i}, \quad (2)$$

где a_i — относительная концентрация ионов сорта i ; m_i — масса ионов этого сорта. В выражении (2) предполагается, что все ионы однозарядные и положительно заряженные.

Нижнегибридный резонанс возникает в широком диапазоне частот, где между частотами электронов и наиболее лёгких ионов существует ветвь плазменных резонансов, которые при $\theta \rightarrow \pi/2$ завершаются НГР-частотой (θ — питч-угол между скоростью частицы и направлением внешнего магнитного поля).

В экспериментах на спутниках были использованы различные методы определения частоты НГР:

- а) метод взаимного импеданса [Михайлов, 1993].
- б) метод искусственного возбуждения плазменных резонансов в ОНЧ-диапазоне с использованием прибора для возбуждения плазмы [Михайлов и др., 1994].
- в) пассивный метод как способ оценки НГР-частоты по нижней частоте отсечки спектра шумовых излучений или свистящих атмосфериков.

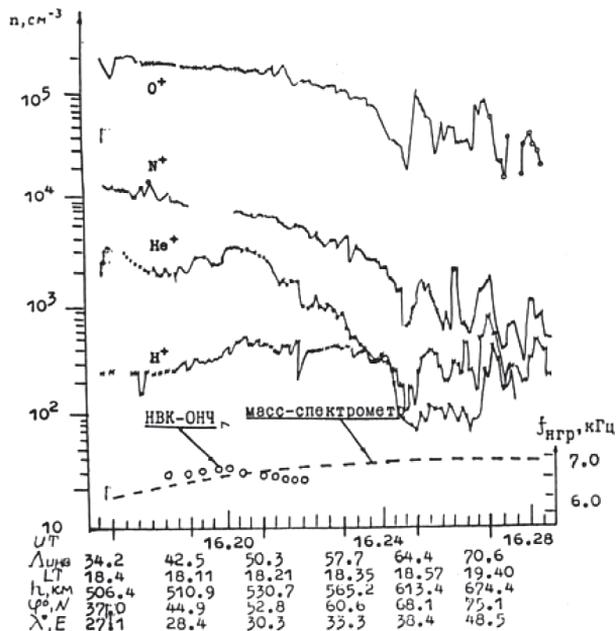


Рис. 2. Концентрация ионов на орбите № 941 при работе прибора возбуждения плазмы (сплошные линии), частота НГР, рассчитанная по данным масс-спектрометра (штриховая линия) и измеренная по спектрограммам НГР-шумов (кружки)

Методы б) и в) были использованы для определения высотного профиля НГР-частоты в сравнении со значениями, полученными по данным масс-спектрометра (рис. 2). В пределах точности измерений значения эффективной массы ионов близко совпадают между собой, подтверждая тем самым эффективность метода волновой диагностики параметров приземной плазмы [Mikhailov et al., 1995].

1.2. Эффект подземного ядерного взрыва

При работе спутника «Интеркосмос-24» было обнаружено ранее неизвестное явление: возбуждение устойчивого долго живущего плазменного канала от подземного ядерного взрыва 24 октября 1990 г. на о-ве Новая Земля [Mikhailov et al., 2000a]. При пролёте спутника над ним через интервал времени $t \approx 17$ мин после взрыва в результате мощного акустического воздействия на ионосферу и магнитосферу наблюдалось резкое усиление (~ 20 дБ) интенсивности ОНЧ-шумов в узком интервале инвариантных широт ($\Delta\Phi \approx 3^\circ$), включающем источник возмущения. Одновременно наблюдалось уменьшение нижней частоты отсечки спектра шумов, совпадающей с НГР-частотой. Спектральная плотность мощности шума была модулирована с пространственными периодами ~ 20 и 100 км. При этом в плазмосфере в широком интервале инвариантных широт Φ от 50 до 30° впервые была зарегистрирована серия цугов эхо-свистящих атмосфериков (СА) с аномально большим числом скачков (~ 40 и более, рис. 3).

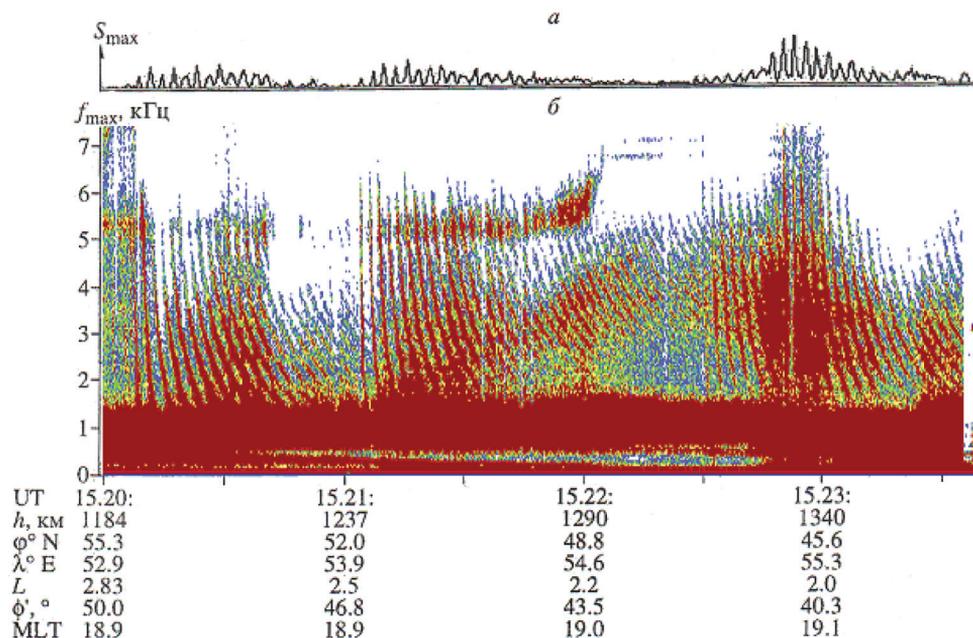


Рис. 3. Цифровая спектрограмма цугов свистящих атмосфериков на орбите № 4868 (б); максимальная спектральная плотность сигналов в полосе частот 2,7...2,9 кГц (а)

Детальный анализ цифровых спектрограмм свистящих атмосфериков показал, что обнаруженные синхронизированные цуги эхо-сигналов имеют период синхронизации $T \approx 50$ с, совпадающий с периодом основной моды альвеновских колебаний L-оболочки, вдоль которой распространялись эти сигналы: $T_A \approx 50$ с на $L = 2,5$ [Рябов, Будько, 2003].

1.3. Эффекты тайфунов в Тихом океане

В сентябре 1990 г. при пролётах спутника над Тихим океаном вблизи экватора в дневное местное время на выходе спектроанализатора была зарегистрирована ранее не наблюдаемая аномально высокая интенсивность электрического поля [Mikhailova et al., 2002]. В этот период на восточном и западном побережье океана действовало десять мощных тайфунов, над которыми спутник пролетал на высотах $h \approx 1500...2000$ км в 12:00–13:00 LT и на $h \approx 550...700$ км в 01:00 LT (Local Time). На рис. 4 приведён пример последовательности орбит, где всплески интенсивности электрического поля вблизи экватора показаны чёрным цветом, а в спектральном распределении интенсивности электрического поля обнаружено максимальное усиление на частотах 8 и 225 Гц.

Этот впервые наблюдаемый аномальный эффект противоречит результатам экспериментальных измерений электрических полей во внешней ионосфере в дневное время, а также теоретическим оценкам коэффициентов затухания КНЧ-электромагнитных волн (ЭВ) при прохождении их через нижнюю ионосферу. По-видимому, причиной ослабления затухания этих волн могут быть мощные атмосферные волны, возбуждаемые во время тайфунов, но не учтённые в современных теоретических моделях нижней ионосферы.

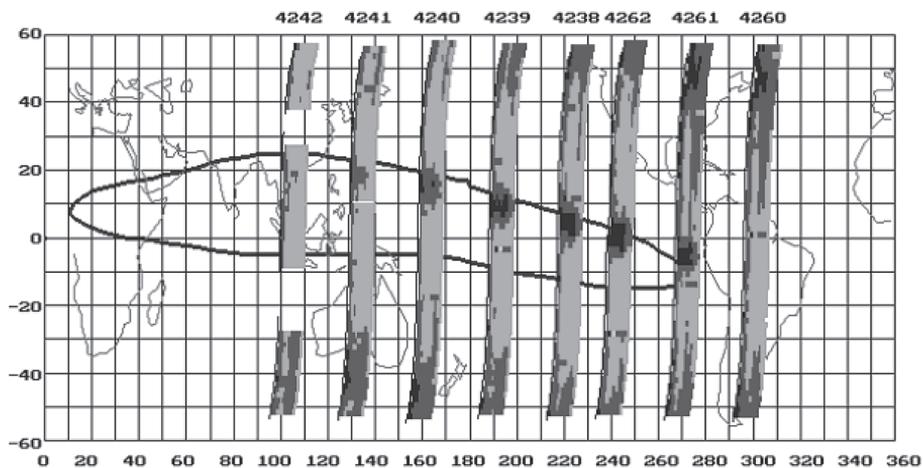


Рис. 4. Проекция орбит спутника «Интеркосмос-24» над экватором 4 и 5 сентября 1990 г. Жирная линия соответствует L-оболочке, равной 1,4 на высоте $h = 2400$ км. Всплески интенсивности электрического поля показаны чёрным цветом на сером фоне

1.4. Эффекты воздействия мощным коротковолновым излучением на ионосферную плазму

Мощное коротковолновое (КВ) излучение, воздействующее на F-слой ионосферы, приводит к образованию искусственной ионосферной турбулентности и эффективному ускорению сверхтепловых электронов ионосферной плазмы. Электроны, распространяясь вдоль силовых линий геомагнитного поля, могут приводить к образованию вытянутых неоднородностей во всей возмущённой силовой трубке, т.е. к образованию плазменных волноводных каналов. Прямое экспериментальное подтверждение этого предположения было получено в эксперименте [Васьков и др., 1993], когда при пролёте спутника над стендом СУРА на высоте $h = 350$ км включался мощный передатчик в импульсном режиме на частоте $f = 4,875$ МГц. Появление частично-диспергированных свистящих атмосфериков, генерируемых молниевыми разрядами в атмосфере Земли и распространяющихся до высот спутника по короткому пути, непосредственно подтвердило развитие искусственного плазменного канала. Оценены характерный радиус возмущённого пятна ~ 200 км и время развития неоднородностей ~ 50 с.

В другом аналогичном эксперименте на высотах $h \approx 500 \dots 1000$ км было обнаружено возбуждение шума на частоте 9,6 кГц и усиление его интенсивности на один-два порядка по величине по сравнению с фоновым уровнем. Предложено два возможных физических механизма: шумы могут генерироваться либо пучком ускоренных сверхтепловых электронов непосредственно во внешней ионосфере, либо вблизи уровня отражения мощной радиоволны и затем распространяться вдоль искусственного плазменного канала [Vas'kov et al., 1998].

1.5. Сейсмоионосферные эффекты и возможный механизм литосферно-ионосферного взаимодействия

На многих зарубежных и отечественных спутниках в режиме узкополосной регистрации наблюдалось усиление интенсивности излучений перед землетрясениями в КНЧ-ОНЧ-диапазонах. Однако до настоящего времени вопрос о природе этого эффекта остаётся спорным. Выполненный нами цикл работ с использованием широкополосной и узкополосной регистраций на борту спутника позволил получить ранее неизвестные данные об этом эффекте. Так, впервые широкополосные записи КНЧ-ОНЧ-излучений были выполнены на спутнике «Интеркосмос-24» при пролёте его за три часа над зоной Иранского землетрясения с началом 20 июня в 21:00:07,1 UT (Universal Time) [Михайлова и др., 1991]. Наблюдаемый характер излучений оказался не шумовым, как указывалось в других исследованиях, а дискретным с характеристиками типичных частично-диспергированных СА. Обнаружены аномально высокая частота их следования и более высокая их интенсивность по сравнению с обычно редко наблюдаемыми сигналами в утренние часы местного времени на аналогичных высотах и широтах, а также большая протяжённость зоны регистрации их по широте. Этот результат показывает, что накануне землетрясения, по-видимому, имеет ме-

сто ослабление затухания КНЧ-ОНЧ-волн при прохождении их во внешнюю ионосферу в результате возрастания проводимости нижней границы ионосферы по сравнению со спокойными сейсмическими условиями. Этот вывод подтвердился также результатами другого эксперимента [Михайлов и др., 1997а], в котором были детально исследованы спектры свистящих атмосфериков при пролёте спутника вдоль Евро-Азиатского разлома в дневное местное время на L-оболочках порядка 1,5...1,9. На рис. 5 показано статистическое распределение частот максимумов в спектре свистящих атмосфериков (а) и относительной интенсивности этих максимумов (б) в различных геофизических условиях.

Полученный результат позволил чётко разделить сейсмические и геомагнитные эффекты в D-области ионосферы, ответственной за прохождение КНЧ-ОНЧ-электромагнитных волн во внешнюю ионосферу. Расширение спектра атмосфериков в область более высоких частот, согласно теории о свойствах коэффициентов прохождения КНЧ-ОНЧ-электромагнитных волн во внешнюю ионосферу, свидетельствует о повышении проводимости нижней ионосферы.

Далее нами был выполнен анализ пространственных и спектральных вариаций электрической компоненты поля в диапазоне частот 8...970 Гц при пролёте спутника над северным разломом Индо-Австралийской плиты [Mikhailov et al., 1999]. Показано, что в ночное время на всех частотах излучение чётко локализовано в пространстве, совпадающем с разломом, а в спектральном распределении выделен максимум на частотах 150...623 Гц. В дни аномальных всплесков концентрации радона в подземных водах, зарегистрированных в долине Кангра (Индия), одновременно наблюдалось усиление интенсивности электрического поля в два-три раза в указанном выше максимуме и более чем на порядок по величине на частоте 8 Гц (частота первого шуманновского резонанса). Этот факт однозначно указывает на молниевые разряды в атмосфере как источник излучений, а усиление интенсивности излучений вызвано ослаблением затухания этих волн при прохождении их через нижнюю ионосферу.

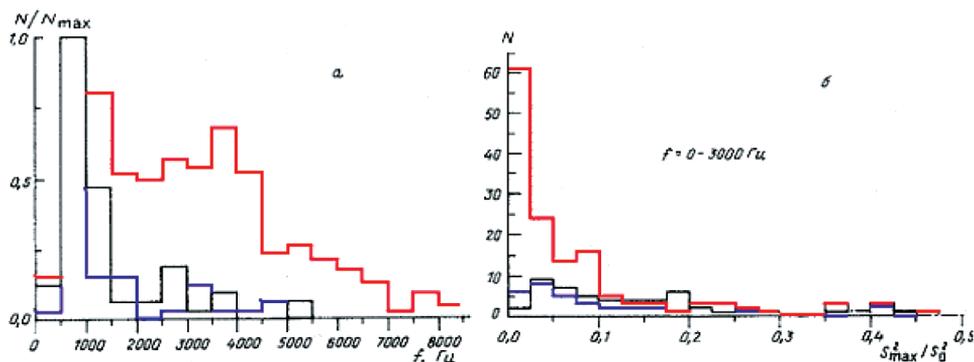


Рис. 5. Гистограммы распределения частот максимумов в спектре свистящих атмосфериков (а) и относительной интенсивности этих максимумов (б) в спокойных условиях при $K_p < 3$ (чёрная линия); при $K_p < 3$, но в сейсмоактивный период (красная линия); при $K_p > 3$ в отсутствие землетрясений (синяя линия)

Обнаружено также усиление излучений в КНЧ-диапазоне в области, сопряжённой с разломом, что свидетельствовало об образовании плазменного волноводного канала над сейсмоактивной областью.

Образование подобных каналов наблюдалось также во время Иранского землетрясения. Оказалось, что эта сейсмически активная зона являлась магнитосопряжённой с местоположением передатчика навигационной системы Omega-Reunion. При наличии сейсмической, но слабой геомагнитной активности ($K_p < 3$) сигналы этого передатчика устойчиво регистрировались в вечернее и ночное местное время в северном полушарии в узкой полосе L-оболочек: $\sim 1,5 \dots 1,9$. Вариации их спектральной плотности мощности как в пределах длительности импульсов, так и между отдельными посылками свидетельствовали об усилении их амплитуды на неоднородностях электронной концентрации в образовавшихся плазменных каналах. Были оценены горизонтальные размеры каналов: от 3 до 200 км на высоте ~ 1000 км [Михайлов и др., 1997б].

2. ОРБИТАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ И ПОИСК ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ — ПРОЕКТ «КОМПАС-2»

Проект «КОМПАС-2» был предназначен для мониторинга околоземного космического пространства с целью обнаружения аномальных физических явлений, связанных как с природными, так и техногенными катастрофами. Этот космический аппарат (КА) был выведен 26 мая 2006 г. на орбиту с апогеем 519,0 км, перигеем 412,3 км, наклоном 78,90° и периодом обращения 93,59 мин [COMPASS 2, 2006] и начал функционировать с ноября 2006 г. На его борту был установлен прибор ШАШ для измерения электрической и магнитной компонент электромагнитного поля в диапазоне частот от единиц герц до 20 кГц, разработанный совместно Группой исследования космоса при Университете Этвёша (Будапешт, Венгрия) и ИЗМИРАН. За короткое время жизни этого спутника было зарегистрировано большое многообразие различного вида сигналов: частично-диспергированные СА и их дуплеты, многотраекторные СА, шумовые всплески, возбуждаемые СА, уширение спектров сигналов ОНЧ-передатчиков.

Одним из ранее неизвестных результатов было обнаружение многотраекторных СА с необычной частотно-временной характеристикой $f(t)$, на которой в области частот ниже 100 Гц с увеличением длительности сигнала частота стремилась к нижнему пределу регистрирующей аппаратуры. Решение полного волнового уравнения для модели концентрического волновода (так называемая «луковичная структура») с учётом модов высоких порядков показало, что наблюдаемый сигнал мог распространяться модом 3-го порядка [Ferencz et al., 2009].

3. АКТИВНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ИСКУССТВЕННОМ СПУТНИКЕ ЗЕМЛИ «ИНТЕРКОСМОС-25»

Спутник «Интеркосмос-25» (АПЭКС) был выведен 18 декабря 1991 г. на орбиту с апогеем 3080 км, перигеем 440 км, наклоном орбиты 82,5°

и периодом обращения 122 мин с целью проведения активных экспериментов в приземной плазме путём инъекции с его борта пучков нейтральных и заряженных частиц.

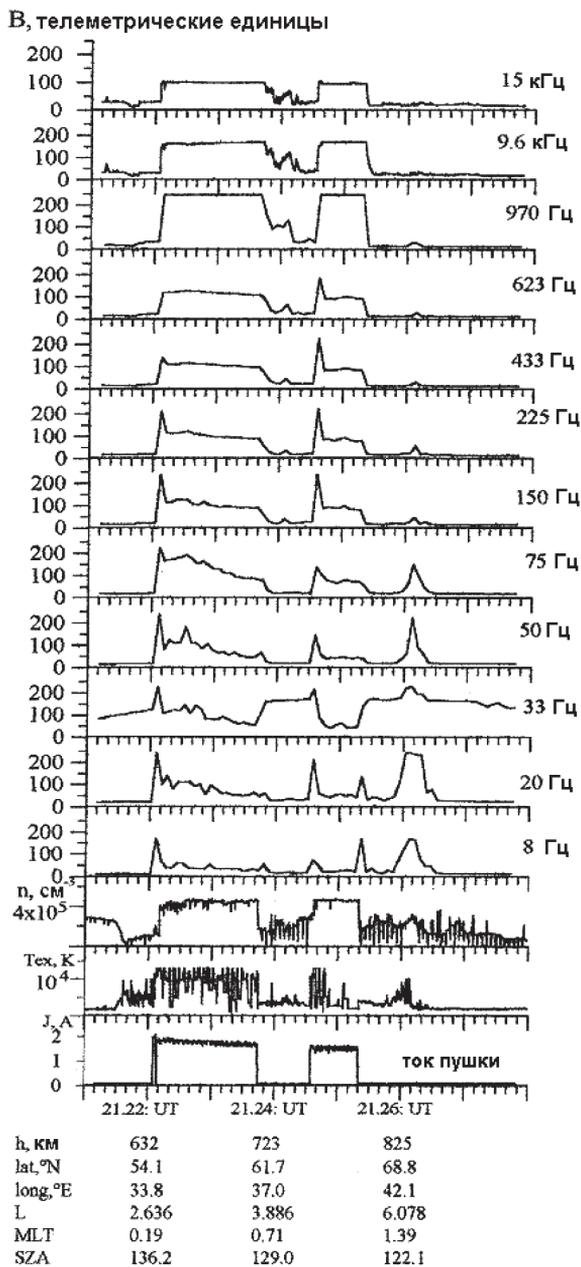


Рис. 6. Спектральное распределение (в относительных единицах) B_x -компоненты в УНЧ-ОНЧ-диапазонах при включении ксеноновой пушки; T_e — температура электронов; n — концентрация ионов; J — импульс тока пушки. По оси абсцисс — время и параметры орбиты № 767

Установленный на борту спутника широкий набор научной аппаратуры (в том числе и НВК-ОНЧ-прибор) позволял исследовать динамические процессы в окрестности источника инжектируемых частиц, а также различного вида стимулированные волновые излучения. Важной особенностью этого проекта было проведение синхронных измерений основных физических параметров среды и стимулированных излучений на двух разнесённых в пространстве космических аппаратах: основной спутник и субспутник «Магион-3». Сигналы в аналоговой форме транслировались на приёмные пункты ИЗМИРАН (Троицк) и Панска Вес (ЧССР).

В качестве примера на рис. 6 приведён результат эксперимента, выполненного 20 февраля 1992 г. при включении генератор (пушка) ионизированного газа ксенон Хе, который работал в двух режимах: без модуляции и с модуляцией тока на различных частотах 62; 125; 250; 500 и 1000 Гц. Направление инжекции было выбрано противоположным скорости спутника под углом 45° к магнитному полю Земли. Одновременно были включены прибор НВК-ОНЧ для измерения магнитной компоненты поля и прибор КМ-0 для измерения концентрации и температуры плазмы [Mikhailov et al., 1998]. Эксперименты показали, что при инжекции плазменной струи в окрестности спутника возбуждается пакет волн в широком КНЧ-ОНЧ-диапазоне. Были оценены линейные размеры плазменной струи. Одновременные записи трёх компонент магнетометра на спутнике позволили оценить направление вектора волновой нормали УНЧ-волн, совпадающее с направлением плазменной струи [Mikhailov et al., 2000b].

4. КОСМИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ВЕГА И GIOTTO

Для исследования физических процессов вблизи кометы Галлея были запущены два космических аппарата «ВЕГА-1» (6 марта 1986 г.) и «ВЕГА-2» (9 марта 1986 г.). В состав научных приборов входил анализатор плазменных волн высокой частоты (АПВ-В). Он включал в себя спектроанализатор, состоящий из 16 фильтров в диапазоне частот 8 Гц – 300 кГц, и регистратор волновой формы сигналов в диапазоне частот 0,1...8 Гц и 0...0,5 Гц [Grard et al., 1986].

Динамика спектров электрического поля при приближении к ядру кометы КА «ВЕГА-1» и «ВЕГА-2» показана на рис. 7 [Грард и др., 1986]. Видно, что по мере приближения к ядру кометы в спектре излучения появляются максимумы на частотах 200...500 Гц, а затем и на частоте 30 Гц. Центральная частота максимума изменяется от 200 Гц на расстоянии 120 тыс. км до ~450 Гц на расстоянии ~30 тыс. км.

Используя записи приборов АПВ-В и «МИША» (данные компонент геомагнитного поля) на КА «ВЕГА-1» детально исследованы энергетические спектры измеренных величин в области после ударной волны (УВ) на расстояниях $(9...6,5) \cdot 10^5$ км от ядра кометы [Mikhailov et al., 1991]. Обнаружен набор достоверных максимумов в спектрах параметров N_e , E_y , B_x , B_y , B_z , B_m , близко совпадающих с ионно-циклотронными частотами соответствующих ионизированных молекул, входящих в состав многокомпонентной плазмы.

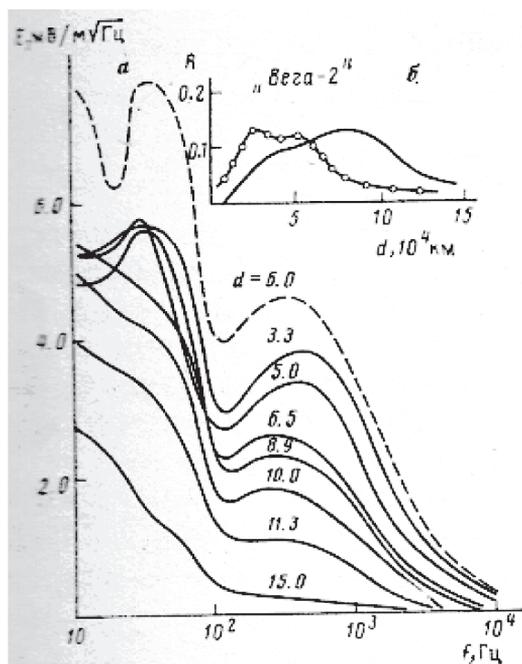


Рис. 7. Динамика спектров электрического поля при приближении к ядру кометы КА «ВЕГА-1» (сплошная линия) и «ВЕГА-2» (пунктирная линия). Цифры на кривых — расстояние до ядра кометы в $[10^4 \text{ км}]$ (а); изменение относительных интенсивностей максимумов на частотах 30 Гц (кружки на кривой) и 200...500 Гц (сплошная кривая) в зависимости от расстояния до кометы (б)

Научная программа ВЕГА была продолжена на КА GIOTTO при пролёте вблизи ядра кометы Григга-Скьеллерупа. В момент сближения его с кометой 10 июля 1992 г. функционировал магнитометр MAG, данные которого (благодаря содействию профессора Ф. Нейбауэра) стали доступны в рамках совместной работы с Институтом геофизики и метеорологии ФРГ. Ниже представлены результаты анализа прямых измерений УНЧ-магнитных полей вблизи кометы, впервые полученные в России.

В момент встречи с космическим аппаратом комета находилась на гелиоцентрическом расстоянии 1,01 а.е., а скорость производства нейтрального газа с поверхности её ядра составляла $(6,7 \pm 1,6) \cdot 10^{27}$ мол/с. 10 июля 1992 г. в 15:18 UT космический аппарат прошёл на расстоянии около 200 км с подсолнечной стороны от ядра. Скорость его относительно кометы была 13,99 км/с, а угол между её вектором и направлением на Солнце — $68,8^\circ$. Головную ударную волну на подлётной части траектории космический аппарат пересёк на расстоянии $1,99 \cdot 10^4$ км от ядра, а на отлётной части — $2,54 \cdot 10^4$ км. Межпланетное магнитное поле во время встречи имело сложную структуру: положительное спиральное направление. Модуль вектора магнитной индукции в невозмущённом кометой солнечном ветре составил 16 нТл, плотность протонов — 8 см^{-3} , альвеновская скорость — 116 км/с, скорость солнечного ветра — 360 км/с [Михайлов, Масленицин, 1996].

II Ионосфера и распространение радиоволн

Был выполнен спектральный анализ данных магнитного поля 10 июля 1992 г. при пролёте по трассе с границами $(6,37...4,57) \cdot 10^4$; $(4,20...2,4) \cdot 10^4$; $(1,26...0,94) \cdot 10^4$; $(0,95...3,43) \cdot 10^4$ км. Первые два интервала расположены до фронта ударной волны. Третий интервал расположен за фронтом УВ и содержит точку наибольшего сближения космического аппарата с ядром кометы. Модуль магнитного поля, достигающего здесь наибольшего значения, представлен на рис. 8. Четвёртый интервал находится полностью на отлётной части траектории КА.

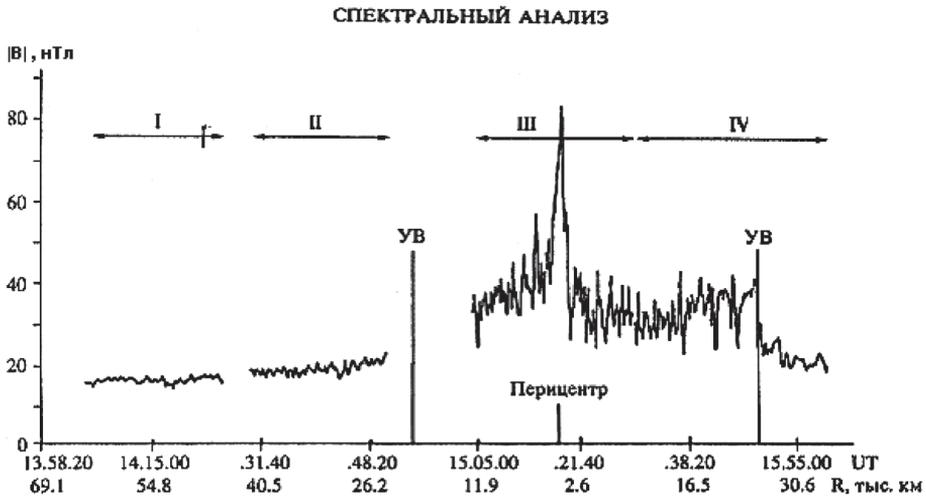


Рис. 8. Зависимость модуля магнитной индукции $|B|$ [нТл] от времени и расстояния до ядра кометы (в [тыс. км]) для участков траектории I–IV; УВ — положение ударной волны на подлётной и отлётной частях траектории

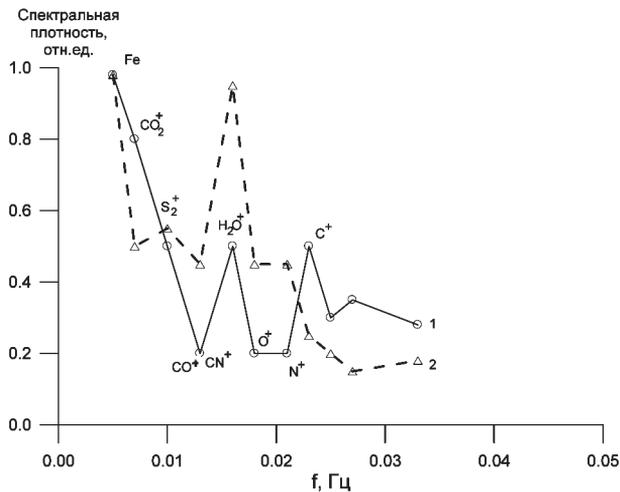


Рис. 9. Спектральная плотность мощности электрического поля вблизи кометы Галлея (кривая 1) и магнитной индукции вблизи кометы Григга-Скьеллерупа (кривая 2) в относительных единицах

Для идентификации спектральных максимумов магнитного поля с тяжёлыми кометными ионами наиболее предпочтителен интервал II, так как на нём магнитное поле достаточно однородно и среднеквадратическое отклонение величины модуля невелико. Близость интервала II к УВ и ядру кометы даёт возможность наблюдать в спектрах большинство тяжёлых ионов, определяющих состав кометной плазмы, и использовать результаты линейной теории возбуждения магнитогидродинамических колебаний. Гирочастоты кометных ионов в системе координат (f_{sw}) и в кометоцентрической системе (f_{sc}) различаются между собой в результате эффекта Доплера. На рис. 9 проведено сравнение спектральной плотности мощности магнитного поля на выделенных частотах вблизи кометы Галлея (кривая 1) с результатами, полученными вблизи кометы Григга-Скьеллерупа (кривая 2). Видно, что в спектрах преобладают максимумы на частотах ионов H_2O и CO_2 . Этот результат согласуется с данными прямых измерений ионного состава кометной плазмы, выполненных в проекте ВЕГА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коллективом лаборатории в кооперации с международными космическими центрами получены следующие наиболее важные результаты исследования особенностей низкочастотных волновых процессов в околоземном космическом пространстве:

1. Разработан эффективный метод низкочастотной волновой диагностики параметров приземной плазмы (эффективная масса ионов, плотность и температура плазмы).
2. Обнаружен эффект подземного ядерного взрыва, проявившийся в образовании устойчивого плазменного канала с возбуждением альвеновских волн. При этом обнаружено существование в этом канале аномально длинной серии эхо-свистящих атмосфериков.
3. Обнаружена аномально высокая интенсивность электрического поля в КНЧ-диапазоне над океаном во время мощных тайфунов.
4. При воздействии мощного КВ-излучения на ионосферную плазму в ОНЧ-диапазоне обнаружено образование искусственного плазменного канала, а также возбуждение шумового излучения.
5. Сейсмоионосферный эффект во внешней ионосфере проявился в усилении УНЧ-КНЧ-ОНЧ-излучений, связанным с повышением проводимости нижней ионосферы, а также в образовании плазменных каналов.
6. Предложен возможный механизм литосферно-ионосферного взаимодействия, рассматривающий в качестве источника электромагнитных волн грозвые разряды в атмосфере, а усиление их во внешней ионосфере связывающий с ростом проводимости ионосферы на высотах порядка 60...90 км.
7. В активных плазменных экспериментах с использованием ионизованного газа ксенон показано, что при инъекции плазменной струи в окрестности спутника возбуждается пакет волн в широком диапазоне КНЧ-ОНЧ-электромагнитных волн.

8. В динамике спектров электрических и магнитных полей в диапазоне УНЧ-КНЧ-ОНЧ-волн при приближении космического аппарата к ядру комет Галлея и Григга-Скьеллерупа обнаружена серия максимумов, совпадающих с ионно-циклотронными частотами соответствующих ионизованных молекул, входящих в состав кометной плазмы.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам лаборатории за большой труд и полученные результаты, коллегам различных подразделений ИЗМИРАН, а также коллегам из Особого конструкторского бюро Московского энергетического института (ОКБ МЭИ) и различных международных космических центров, участвующих в проведении совместных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- [Васьков и др., 1993] *Васьков В. В., Беляев П. П., Будько Н. И., Капустина О. В., Комраков г. П., Маресьев А. Н., Михайлова г. А., Михайлов Ю. М., Прутенский И. С.* Формирование ОНЧ-каналов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 1993. Т. 33. № 6. С. 91.
- [Гдалевич и др., 2003] *Гдалевич Г. Л., Клос Э., Михайлов Ю. М.* Возбуждение КНЧ-ОНЧ-электрических полей в ионосферной плазме в активных экспериментах (данные ИСЗ «Интеркосмос-24») // Геомагнетизм и аэронавигация. 2003. Т. 43. № 5. С. 645.
- [Грард и др., 1986] *Грард Р., Бегин К., Могилевский М., Михайлов Ю., Молчанов О., Педерсен А., Тротиньон Ж.-Г., Формизано В.* Наблюдения электрических полей и плазмы вблизи кометы Галлея // Письма в Астрон. журн. 1986. Т. 12. № 9. С. 683.
- [Михайлов, 1993] *Михайлов Ю. М.* Возбуждение НЧ-сигналов и шумов в ионосферной плазме электрическим диполем // Магнитосферные исслед. 1993. № 20. М.: Наука, 1993. С. 1.
- [Михайлов, Масленицин, 1996] *Михайлов Ю. М., Масленицин С. Ф.* Спектральный анализ ультранизкочастотных магнитных полей кометы Григга-Скьеллерупа // Космич. исслед. 1996. Т. 34. № 3. С. 283.
- [Михайлов и др., 1994] *Михайлов Ю. М., Еришова В. А., Ростэ О. З., Шульчишин Ю. А., Шмилауэр Я., Капустина О. В., Кочнев В. А.* Низкочастотные волновые и масс-спектрометрические измерения на спутнике «Интеркосмос-24» // Геомагнетизм и аэронавигация. 1994. Т. 34. № 2. С. 68.
- [Михайлов и др., 1997а] *Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В.* КНЧ-и ОНЧ-электромагнитный фон во внешней ионосфере над сейсмоактивными регионами (ИСЗ «Интеркосмос-24») // Геомагнетизм и аэронавигация. 1997. Т. 37. № 4. С. 78.
- [Михайлов и др., 1997б] *Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В.* Тонкая структура спектров сигналов ОНЧ-передатчиков над зоной иранского землетрясения 1990 г. (ИСЗ «Интеркосмос-24») // Геомагнетизм и аэронавигация. 1997. Т. 37. № 5. С. 99.
- [Михайлова и др., 1991] *Михайлова Г. А., Голявин А. М., Михайлов Ю. М.* Динамические спектры ОНЧ-излучений во внешней ионосфере, связанных с иранским землетрясением 21 июня 1990 г. (ИСЗ «Интеркосмос 24») // Геомагнетизм и аэронавигация. 1991. Т. 31. № 5. С. 801.

- [Рябов, Будько, 2003] *Рябов Б. С., Будько Н. И.* Альевновский контроль длинных цугов эхо свистов // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43. № 4. С. 533.
- [COMPASS 2, 2006] COMPASS 2 // Space Res. Today. 2006. No. 167. P. 119.
- [Ferencz et al., 2009] *Ferencz O. E., Bodnar L., Ferencz C., Hamar D., Lichtenberger J., Steinbach P., Korepanov V., Mikhailova G., Mikhailov Yu., Kuznetsov V.* Ducted whistlers propagating in higher order guided mode and recorded on board of COMPASS-2 satellite by the advanced Signal Analyzer and Sampler 2 // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A03213. doi: 10.1029/2008JA013542.
- [Grard et al., 1986] *Grard R., Pedersen A., Trotignon J.-G., Beghin C., Mogilevsky M., Mikhailov Yu., Molchanov O., Formisano V.* Observations of waves and plasma in the environment of comet Halley // Nature. 1986. V. 321. No. 6067. P. 290.
- [Klos et al., 1998] *Klos Z., Gdalevich G., Mikhailov Yu., Bankov L., Gusheva M.* Plasma waves observed during Xenon gas releases on the Active satellite // Adv. Space. Res. 1998. V. 21. No. 5. P. 717.
- [Mikhailov et al., 1991] *Mikhailov Yu. M., Kapustina O. V., Mikhailova G. A., Eroshenko E. G., Styazkin V. A., Trotignon J. G., Sauer K.* Spectral structure of ultralow-frequency electromagnetic fields near comet Halley // Commentary plasma processes. Geophys. monogr. ser. V. 61 / Ed. Johnstone A. D. Washington: AGU, 1991. P. 171.
- [Mikhailov et al., 1995] *Mikhailov Yu. M., Kapustina O. V., Ershova V. A., Roste O. Z., Shulchishin Yu. M., Kochnev V. A., Shmilauer J.* Definition of the low hybrid frequency by active wave method on Intercosmos-24 satellite and comparison these data with mass-spectrometer measurements // Adv. Space Res. 1995. V. 15. No. 12. P. 147.
- [Mikhailov et al., 1998] *Mikhailov Yu. M., Oraevsky V. N., Sobolev Ya. P., Dokukin V. S., Kapustina O. V., Afonin V. V.* Waves generated in the vicinity of the Xenon plasma gun in the APEX - experiment // Adv. Space Res. 1998. V. 21. No. 5. P. 716.
- [Mikhailov et al., 1999] *Mikhailov Yu. M., Mikhailova G. A., Kapustina O. V.* ULF-ELF electromagnetic emission over the fault in Kangra Valley of India and their relation with radon emanation (Intercosmos 24 satellite data) // J. Tech. Phys. 1999. V. 40. No. 1. P. 317.
- [Mikhailov et al., 2000a] *Mikhailov Yu. M., Mikhailova G. A., Kapustina O. V.* VLF effects in the outer ionosphere from the underground nuclear explosion on Novaya Zemlya island on 24 October, 1990 (Intercosmos 24 satellite data) // Phys. Chem. Earth . 2000. V. 25. No. 1-2. P. 93.
- [Mikhailov et al., 2000b] *Mikhailov Yu. M., Oraevsky V. N., Sobolev Ya. P., Dokukin V. S., Kapustina O. V., Shibaev I. G., Afonin V. V.* Waves generated in the vicinity of the Xenon plasma gun in the APEX — experiment // Phys. Chem. Earth (C). 2000. V. 25. No. 1-2. P. 67.
- [Mikhailova et al., 2002] *Mikhailova G. A., Mikhailov Yu. M., Kapustina O. V.* Variations of ULF-VLF electric fields in the external ionosphere over powerful typhoons in Pacific Ocean // Adv. Space Res. 2002. V. 30. No. 11. P. 2613.
- [Vas'kov et al., 1998] *Vas'kov V. V., Boud'ko N. I., Kapustina O. V., Mikhailov Yu. M., Ryabova N. A., Gdalevich G. L., Komrakov G. P., Maresov A. N.* Detection on the Intercosmos 24 satellite of VLF and ELF waves stimulated in the topside ionosphere by the heating facility SURA // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1998. V. 60. No. 12. P. 1261.

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF ULF-ELF-VLF ELECTROMAGNETIC WAVES
GENERATION AND PROPAGATION IN THE NEAR-EARTH SPACE**

Mikhailov Yu. M.

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

The same important results of ULF-ELF-VLF waves peculiarities in the near-Earth space, received on the satellites: Intercosmos 24, Intercosmos 25, VEGA 1, VEGA 2, GIOTTO, have been presented.

Keywords: satellites, Intercosmos 24, Intercosmos 25, VEGA 1, VEGA 2, ULF-ELF-VLF electromagnetic waves.

Mikhailov Yury Mikhailovich — head of laboratory, doctor of physical and mathematical sciences, professor, yumikh@izmiran.ru