

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА, ИОНОСФЕРЫ  
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

# Низкочастотные волны и сигналы в магнитосфере Земли



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
МОСКВА 1980

Г.Л. Гдалевич, Я.И. Лихтер, В.И. Ларнина, Ю.М. Михайлов

ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ И СПЕКТРА КНЧ- И ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ  
В ГЛАВНОМ ИОНОСФЕРНОМ ПРОВАЛЕ

Характеристики магнитосферной плазмы двояким образом влияют на свойства наблюдаемых в ней низкочастотных электромагнитных волн. В той области пространства, где возбуждаются излучения, их частота и интенсивность зависят как от состава, концентрации и температуры тепловой плазмы, так и от состава, энергии и функции распределения ее энергичной компоненты [1, 2]. Вдали от области возбуждения, в том месте, куда волны проникают, пройдя более или менее протяженный путь в магнитосфере, и куда одновременно могут сойтись волны от нескольких источников, связь характеристик волн с условиями их возбуждения маскируется. Структура поля волн в этих условиях зависит от локальных свойств плазмы и от пути, пройденного волнами.

В области ионосферного провала изменения состава и концентрации плазмы столь велики, что следует ожидать существенных изменений структуры поля низкочастотных волн при сравнительно небольших перемещениях приемника (ИСЗ). В литературе описаны некоторые характерные изменения поля на широтах, где обычно наблюдается ионосферный провал. Так, на спутнике "Ариэль-4" [3] было обнаружено преимущественное увеличение амплитуды ОНЧ-излучений (3,2 кГц) при прохождении спутника через среднеширотный провал концентрации сравнительно с амплитудой КНЧ-излучений (0,75 кГц).

Анализ одновременных регистраций на ИСЗ "Интеркосмос-10" концентрации электронов, их температуры и спектра ОНЧ-излучений показал, что специфические шумы нижнего гибридного резонанса отображают присущее главному провалу уменьшение концентрации легких ионов [4].

Ниже будут обсуждены экспериментальные факты относительно вариаций спектра ОНЧ-излучений ("Интеркосмос-10") и амплитуды взаимно перпендикулярных компонент магнитного и электрического поля КНЧ-волн ("Интеркосмос-14") при прохождении спутников через главный ионосферный провал. Сопоставление этих двух компонент поля КНЧ-излучений позволяет сделать определенные заключения об изменении структуры поля волн. Одновременные регистрации концентрации плазмы на этих спутниках и температуры электронов ("Интеркосмос-10") позволили в деталях рассмотреть конфигурацию главного ионосферного провала в этих условиях.

1. ГЛАВНЫЙ, ИЛИ СРЕДНЕШИРОТНЫЙ, ПРОВАЛ КОНЦЕНТРАЦИИ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Измерения широтного распределения концентрации заряженных частиц ( $N_e$  или  $N_i$ ) наземными и спутниковыми методами обнаруживают наиболее устойчивый минимум на геомагнитных широтах (50–60°) [5, 6]. Этот минимум получил название главного или среднеширотного ионосферного провала. Сразу же после сравнительно детального его исследования, проведенного Малдрю, было обращено внимание на соответствие провала по  $L$ -оболочкам плазмпause и возможности его связи с процессами в магнитосфере [5, 7]. Основные морфологические особенности провала установлены и сводятся к следующему.

Главный, или среднеширотный, провал (возможно, на больших высотах провал легких ионов; об этом см. ниже) наблюдается в магнитоспокойных условиях на инвариантных широтах 50–65°, в возмущенные периоды на инвариантных широтах 35–50° в области высот 200–300 км. Наиболее четко проявляется он в ночное время зимой в годы минимума солнечной активности. Отметим, что отсутствуют сведения о стабильности структуры провала ото дня ко дню в одни и те же интервалы местного времени. Ниже будут приведены случаи наблюдения провала в аналогичных геофизических условиях в одно и то же местное время с интервалом в одни сутки.



сравнению с соседними широтами. Положение максимума  $T_e$  приходится на широту экваториальной границы провала.

Средняя масса ионов в провале увеличивается, но менее резко, чем в ночное время. Полярная граница провала совпадает с высокоширотной границей неоднородностей концентрации. Некоторая разница в ширине провала, значениях температуры и концентрации в нем днем и ночью может быть связана с различием потоков электронов, высыпавшихся на полярных границах провала. Возможно, с этим связано различие в изменениях интенсивности ОНЧ. На дневной стороне полярная граница, как указывалось выше, совпадает (или близка) с экваториальной границей клефта (щели) или каспа (воронки). В области клефта электроны и протоны солнечного ветра из переходного слоя попадают на ионосферные высоты. Их энергия  $\sim 100$  эВ для электронов и  $\sim 1$  кэВ для протонов. На ночной стороне на полярную границу провала и севернее на ионосферные высоты попадают уже электроны из плазменного слоя клефта с ночной стороны. Их энергия  $\sim 10$  кэВ для электронов и  $\sim 100$  кэВ для протонов.

Как уже отмечалось выше, главный, или среднеширотный, провал располагается на инвариантных широтах, соответствующих по  $L$ -оболочкам плазмопаузе. Вопросу об этом соответствии посвящено значительное число работ [16–20]. Если в первых исследованиях статистически находили соответствие провала концентрации электронов плазмопаузе, то после обнаружения более часто наблюдающегося провала легких ионов стали связывать с плазмопаузой именно эту область с дефицитом концентрации легких ионов. Однако уже в 1970–1972 гг. было обращено внимание на то, что это соответствие не может наблюдаться всегда из-за различного времени восстановления исходного состояния на малых и больших высотах после магнитных бурь. В настоящее время ясно, что провал легких ионов и главный ионосферный провал не являются простым отображением по  $L$ -оболочке плазмопаузы [20]. Соответствие между ними довольно сложное и может, по нашему мнению, в какой-то степени прослеживаться по их связи с магнитосферным электрическим полем, создающим конвекцию плазмы и играющим существенную роль в образовании плазмопаузы и провалов.

## 2. ВАРИАЦИИ СПЕКТРА ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ В ЗОНЕ ПРОВАЛА. ШУМЫ НИЖНЕГО ГИБРИДНОГО РЕЗОНАНСА

Наиболее характерным видом ОНЧ-излучений в области провала являются шумы нижнего гибридного резонанса, хотя возможно наблюдение и других видов ОНЧ-излучений, а также градиентно-дрейфовых волн вследствие существования резких градиентов температуры и концентрации тепловой плазмы.

С нижним гибридным резонансом плазмы связан целый ряд явлений в низкочастотном диапазоне. Некоторые из них обусловлены рефракцией волн в неоднородной магнитоактивной плазме. При так называемом неканализованном распространении волн, если частота волны совпадает с  $\omega_{\text{НГ}}$  и в результате рефракции угол  $\theta$  между  $\vec{k}$  и  $\vec{B}_0$  достигает  $\pi/2$ , наступает отражение волн [21]. На ИСЗ регистрировались многочисленные сигналы, в спектре которых наблюдались подобные эффекты [21–25]. При регистрации шумовых излучений на ИСЗ также были обнаружены специфические эффекты нижнего гибридного резонанса плазмы — ограничение спектра шума снизу на частоте  $\omega_{\text{НГ}}$  и усиление амплитуды шума в окрестности этой частоты [22–25]. Такие шумовые излучения, с характерным обрезанием спектра снизу, чаще всего наблюдаются в субавроральных и авроральных широтах — они получили название шумов нижнего гибридного резонанса и проявляются в основном в электрической компоненте ОНЧ-волн. Эти явления интерпретировались как результат отражения волн из-за рефракции или возбуждения (или усиления) волн в условиях, когда фазовая скорость волн мала, что благоприятствует реализации неустойчивостей [21, 22, 26, 27].

На спутнике "Интеркосмос-10" одновременно измерялись ОНЧ-излучения (с помощью электрической антенны) и концентрация и температура ионосферной плазмы (с помощью зонда Ленгмюра). При прохождениях спутника в средних и

высоких широтах были обнаружены изменения концентрации и температуры электронов, характерные для главного ионосферного провала. На инвариантных широтах  $\Phi \geq 50^\circ$  концентрация электронов уменьшалась на порядок сравнительно с величиной на меньших широтах, а температура электронов резко возрастала, достигая 6000 К и больше, что соответствует представлениям, развитым в предыдущем параграфе. Одновременно было обнаружено, что при вхождении спутника в провал (малые величины  $N_e$  и большие значения  $T_e$ ) понижается частота нижней границы спектра ОНЧ-излучений [4,28]. На рис. 1 приведен пример вариаций  $N_e$ ,  $T_e$  и спектра ОНЧ-излучений, зарегистрированных на витке 679 спутника "Интеркосмос-10" 18. XII 1973 г. Инвариантная широта спутника при его движении по орбите уменьшалась в пределах  $68,2 > \Phi > 35^\circ, 4$ , а высота увеличивалась от  $h = 400$  км до  $h = 1300$  км. Спутник все время находился в затененной ионосфере (зенитный угол Солнца на высоте спутника больше  $100^\circ$ ). Регистрация  $N_e$ ,  $T_e$  и ОНЧ-шумов началась, когда спутник уже находился в провале. Концентрация электронов составляла  $N_e = 2 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup>, а температура электронов  $T_e \approx 6000$  К. По мере перемещения спутника к меньшим широтам концентрация увеличивалась, а температура уменьшалась — спутник выходил из области провала. При  $\Lambda \approx 52 \pm 49^\circ$  спутник вышел из провала, и концентрация установилась на постоянном уровне  $N_e \approx 2 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup>, а температура составила  $T_e \approx 3500$  К с флуктуациями  $\pm 500$  К. В верхней части рис. 1 схематически изображена спектральная полоса ОНЧ-шумов. Видно, что вначале спектр шума занимал полосу  $\Delta f \approx 3,5$  кГц между  $f_H = 3,5$  кГц и  $f_B = 7$  кГц. Граничные частоты шумовой полосы возрастали при увеличении  $N_e$ . При пересечении широты  $\Lambda = 57^\circ$  полоса шума расширилась из-за резкого возрастания верхней граничной частоты. Нижняя же граничная частота с небольшими флуктуациями продолжала постепенно возрастать. Это повлекло за собой общее сокращение спектральной полосы шума. Шумовые ОНЧ-излучения наблюдались вплоть до  $\Phi \approx 47^\circ$ , когда в большом количестве начали регистрироваться сигналы свистящих атмосфериков. При этом нижняя граничная частота шума возросла до  $f_H \approx 14$  кГц.

Таким образом, при прохождении спутника через область главного ионосферного провала обнаруживаются коррелированные значительные изменения электронной концентрации и нижней граничной частоты ОНЧ-излучений и противоположные по знаку изменения электронной температуры.

Описанная картина изменения  $N_e$ ,  $T_e$  и спектра шумовых ОНЧ-излучений является типичной и многократно наблюдалась при прохождении спутника "Интеркосмос-10" через область главного ионосферного провала [3].

Связь нижней частоты шумовой полосы ОНЧ-излучений и концентрации электронов, по-видимому, можно понять лишь приняв, что эта частота близка к частоте нижнего гибридного резонанса. Это предположение подтверждается также и тем фактом, что на спутнике "Интеркосмос-14", где одновременно регистрировались электрическая и магнитная составляющие поля ОНЧ-излучений, при прохождении спутника через область провала шумы принимались только на электрическую антенну и не обнаруживались в магнитном канале. Это имеет место лишь в том случае, когда волна электростатическая, что характерно для шумов нижнего гибридного резонанса [29].

Известно, что частота нижнего гибридного резонанса выражается формулой

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

где  $f_{0e}$  и  $f_{Be}$  — плазменная и гирочастота электронов,  $m_e$  и  $m_p$  — масса электронов и протонов ( $m_p/m_e = 1836$ ) и  $m_{\text{эф}}$  — эффективная масса ионов. При наибольших значениях электронной концентрации, наблюдавшихся вблизи провала на спутнике "Интеркосмос-10" ( $N_e \approx 10^4$  см<sup>-3</sup>),  $f_{0e} \approx 0,9 \cdot 10^6$  Гц, а электронная гиро-

Рис. 1. Хар- и температу

частота на с- учитывая, ч

$$f_{\text{НГ}} = f_{0e}$$

Таким об- вях описы- нов, т. е. ( $N$  также и эфф- порциональ-

$$(m_{\text{эф}})^{-1} =$$

где  $a_i$  — от- В (3) предпо- риваемых в-

Используй- ничной част-

(см. также | ределения  $m$  ласно приве- Вне провала | глубине про- венно увели- ионов, в пер- большей ил- ласть пров- ниями (см. 8



температуры элект-  
антных широ-  
нительно с  
озрастала,  
звтом в пре-  
дении спутни-  
ча частота  
пример вари-  
ке 679 спут-  
ика при его дви-  
та увеличива-  
затененной  
). Регистра-  
провале. Кон-  
электронв  
концентрация  
области про-  
установилась  
 $T_e \approx 3500$  К  
бражена спект-  
иал полосы  
шумовой по-  
57° полоса  
астоты. Ниж-  
постепенно  
й полосы шума.  
ольшом коли-  
. При этом

ого ионосфер-  
енения элект-  
противополож-

излучений яв-  
ника "Интер-

трации элект-  
лизка к частот-  
ется также и  
регистриро-  
ний, при про-  
ко на электр-  
ет место лишь  
шумов ниж-

ся формулой

(1)

масса электро-

При наиболь-  
ровала на спут-  
ронная гиро-

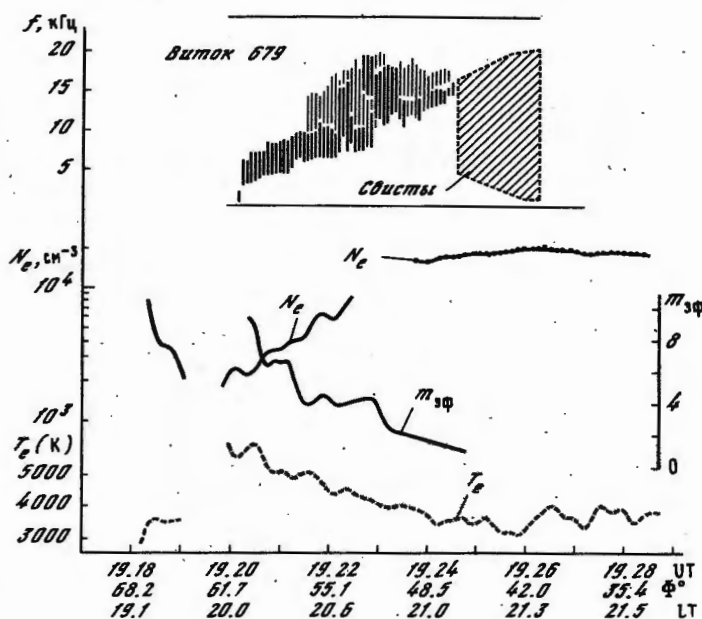


Рис. 1. Характерное изменение спектра шумов НГР, электронной плотности  $N_e$  и температуры  $T_e$  по данным ИСЗ "Интеркосмос-10"

частота на соответствующих высотах полета спутника  $f_{B_e} \gg 5,5 \cdot 10^6$  Гц. Тогда, учитывая, что  $f_{B_e}^2 / f_{0_e}^2 \gg 1$ , вместо (1) получим

$$f_{\text{НГ}} = f_{0_e} / \sqrt{m_{\text{эф}}} \left( \sqrt{\frac{m_e}{m_p}} \right) \quad (2)$$

Таким образом, из (2) следует, что нижняя гибридная частота плазмы в условиях описываемого эксперимента пропорциональна плазменной частоте электронов, т. е.  $(N_e)^{1/2}$ . В провале изменяется ионный состав плазмы, т. е. изменяется также и эффективная масса ионов и как следствие изменяется коэффициент пропорциональности в (2),  $m_{\text{эф}}$  определяется формулой

$$(m_{\text{эф}})^{-1} = \sum_i a_i / \left( \frac{m_i}{m_p} \right), \quad (3)$$

где  $a_i$  — относительная концентрация ионов сорта  $i$ , а  $m_i$  — масса иона сорта  $i$ . В (3) предполагается, что все ионы положительные и однозарядные. Для рассматриваемых высот  $\sim 1000$  км эти предположения вполне оправданны.

Используя приведенные выше формулы и наблюдаемые значения нижней граничной частоты в ОНЧ-спектре  $f_{\text{СО}} = f_{\text{НГ}}$  и  $N_e$ , можно определить величину  $m_{\text{эф}}$  (см. также [30], где рассмотрены относящиеся сюда методические вопросы определения  $m_{\text{эф}}$ ). На рис. 1 изображена кривая изменения  $m_{\text{эф}}$ , вычисленная согласно приведенной здесь методике для витка 679 спутника "Интеркосмос-10". Вне провала  $m_{\text{эф}} \sim 2$ , т. е. в плазме преимущественно присутствуют протоны. В глубине провала, где концентрация минимальна, эффективная масса ионов существенно увеличилась ( $m_{\text{эф}} \sim 10$ ). Это означает, что резко увеличилось содержание ионов, в первую очередь ионов кислорода. Такой результат, наблюдавшийся в большей или меньшей степени при всех прохождениях спутника через область провала, хорошо согласуется с масс-спектрометрическими измерениями (см. § 1).

Таблица 1

Дата	$K_p$	$H$ , км	Инвариантная широта $\Phi^\circ$	Местное время LT	$N_e$ , см $^{-3}$	$T_e$ , К	$m_{i\text{эф}}$	Примечания
07.XII 1973	1	550-650	54-61	22-23	$2 \cdot 10^3$	3000 ÷ 4000	1-2	
12.XII 1973	2	560-630	61-64	20-22	$3 \cdot 10^3$	3800	16	Авроральный пик
			64-66	20-22	$2 \cdot 10^4$	3000	25,5	
			66-68	20-22	$7 \cdot 10^3$	4000	7-16	
18.XII 1973	1+	750-850	52-56	20-21	$8 \cdot 10^3$	4500	3	
24.XII 1973	0+	990-1088	56-63	20-21	$1,5 \cdot 10^3$	5000 ÷ 6000	18,5	
			61-67	17-18			1	
25.XII 1973	2-			17-18			5	
3.I 1974	2+	1085-1250	49-58	19-20	$(1 \div 6) \cdot 10^3$		1-4	
			58-64	17-18	$6 \cdot 10^3$		1-2	
23.I 1974	1+	750-1000	37-56	6-7	$6 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^2$		5	
4.II 1974	1+	1100-1300	48-57	03-05	$(1 \div 2) \cdot 10^4$	5000 ÷ 9000	4	
22.II 1974	4-	1000-1200	49-53	23-00	$2 \cdot 10^3 \div 7 \cdot 10^2$		1	
			53-59	23-00	$1,5 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^3$	2800	1	
			48-61	20-22	$2 \cdot 10^2$	5000-6000	3	
12.III 1974	3	1180-1360	61-67		$5 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^2$		1	
							5	

Рис. 2. Характер температуры валом в один

В табл. 1  
 ронной конце  
 го сезона 19  
 лось в 8 л, т  
 ко выражен  
 чаев, можно  
 В провад  
 нем плазм  
 ся увеличи  
 сы не всегд  
 наблюдается  
 пространств  
 теризовать  
 до 900 км э  
 высотах, б  
 что соответ  
 $m_{i\text{эф}} \sim 1$  мо  
 риде случае  
 значения мс  
 тий в прова  
 [31].

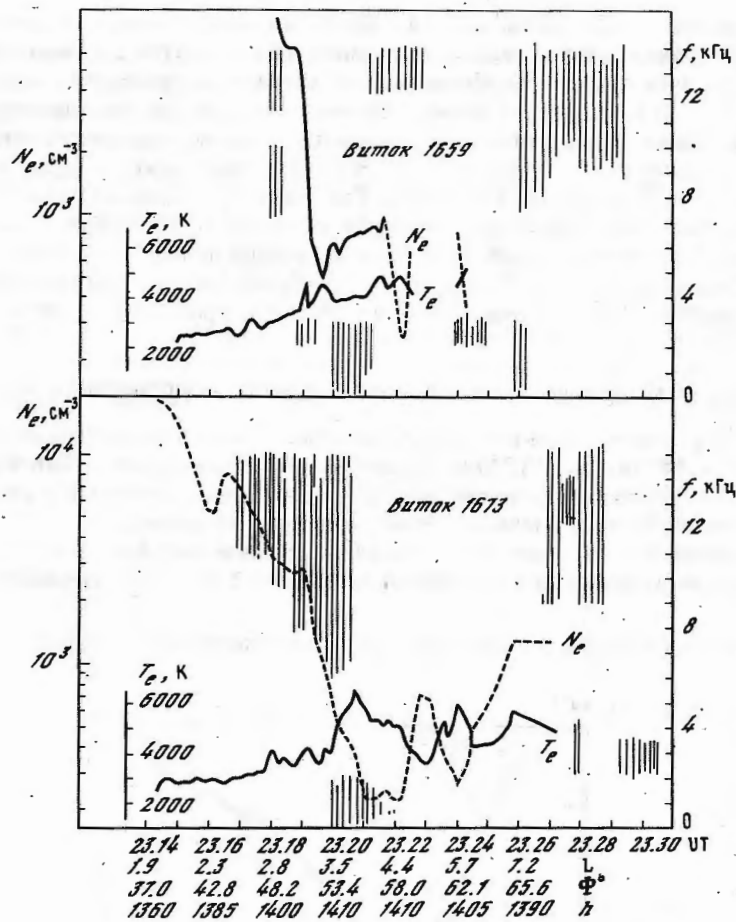


Рис. 2. Характерное изменение спектра ОНЧ-шумов, электронной плотности и температуры для двух случаев регистрации среднеширотного провала с интервалом в одни сутки

В табл. 1 приведены некоторые случаи анализа регистраций в провале электронной концентрации и связанного с ним изменения спектра ОНЧ-шумов для зимнего сезона 1973/74 г. в северном полушарии вечером и ночью. Как уже указывалось в § 1, провал в условиях умеренной магнитной возмущенности наиболее четко выражен в ночное время. Несмотря на ограниченное число рассмотренных случаев, можно отметить следующие закономерности.

В провале  $m_{\text{эф}}$ , как правило, возрастает, что связано с конвективным движением плазмы вдоль низкоширотной границы авроральной зоны, сопровождающимся увеличением рекомбинации плазмы. Положение максимума эффективной массы не всегда точно соответствует минимуму электронной концентрации, иногда наблюдается смещение на несколько градусов (см. рис. 4 в [28]). Что касается пространственного распределения  $m_{\text{эф}}$  в области провала, то его можно охарактеризовать следующим образом: на широтах ниже  $60^\circ$  в интервале высот от 550 до 900 км эффективная масса равна 3 или колеблется около этого значения, на высотах, больших 900–1000 км, на тех же широтах эффективная масса равна 1, что соответствует протонной плазме. На широтах выше  $60^\circ$  наряду со значениями  $m_{\text{эф}} \sim 1$  могут наблюдаться и довольно высокие значения  $m_{\text{эф}} \sim (5 \pm 18,5)$ . В ряде случаев наблюдаются очень высокие значения  $m_{\text{эф}}$ , вплоть до 25,5. Такие значения могут быть объяснены изменением скорости ионно-молекулярных реакций в провале, в частности реакций, перерабатывающих ионы  $O^+$  в молекулярные [31].



Отметим еще одну особенность: 24 и 25. II нам удалось зафиксировать последовательное прохождение провала с интервалом в одни сутки в аналогичных геофизических условиях (рис. 2). Несмотря на то что этот период был возмущенным ( $K_p = 4+$  и  $K_p = 3+$ ), структура провала (перепад  $N_e$ , положение некоторой средней границы провала) для этих двух случаев довольно хорошо совпадает. Интересно, что при этом наблюдаемые виды ОНЧ-излучений также совпадают, сохраняя даже некоторое сходство в спектре. Так, на экваториальной границе провала наблюдаются шипения с некоторой добавкой шумов НГР. В глубине провала наблюдается полоса КНЧ-шипений; на полярной границе провала — полярные и КНЧ-шипения. Такое подобие изменений шумов в провале свидетельствует об их локальном происхождении и о стабильности структуры провала ото дня ко дню.

### 3. ВАРИАЦИИ АМПЛИТУДЫ КНЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА

Выше мы рассматривали изменения спектра, а теперь по материалам ИСЗ "Интеркосмос-14" (декабрь 1975 г.) будет рассмотрена вариация амплитуд магнитной и электрической компонент поля низкочастотных излучений в связи с изменениями концентрации плазмы в зоне ионосферного провала.

На спутнике "Интеркосмос-14" с помощью сферических ловушек проводились измерения суммарной ионной концентрации плазмы  $\sum n_i = N_i$ . Вследствие квазинейтральности плазмы эта величина равна электронной концентрации  $N_e$ .

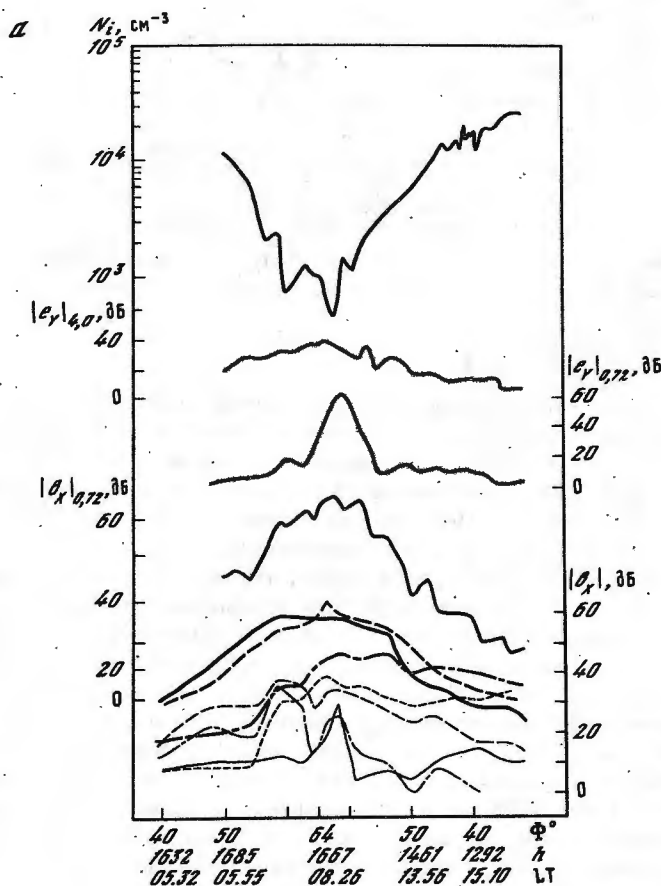


Рис. 3. Вариации концентрации плазмы ( $N_i$ ) и электрической ( $e_Y$ ) и магнитной ( $b_X$ ) компонент поля на ИСЗ "Интеркосмос-14" 16. XII 1975 г.  
а — виток 69 (южное полушарие), б — виток 70 (северное полушарие). Пунктир —

Пусть  $\dots$   
продольно  
ная рамка  
зом, что р  
ческой ( $e_Y$   
страции ОН  
тоте 0,72  
магнитной  
на частоте  
кания каж  
шивались  
0,72 кГц,  
рашивалис  
та на ИСЗ  
В дека  
и ночью на  
на высота  
ты спутни  
вал, либо,

0,17 кГц,  
жирная —  
2,5 кГц, с

ровать после-  
логичных гео-  
возмущенным  
которой сред-  
дает. Инте-  
дают, сохра-  
анице провала  
провала на-  
ярные и КНЧ-  
ет об их ло-  
я ко дню.

### О ПРОВАЛА

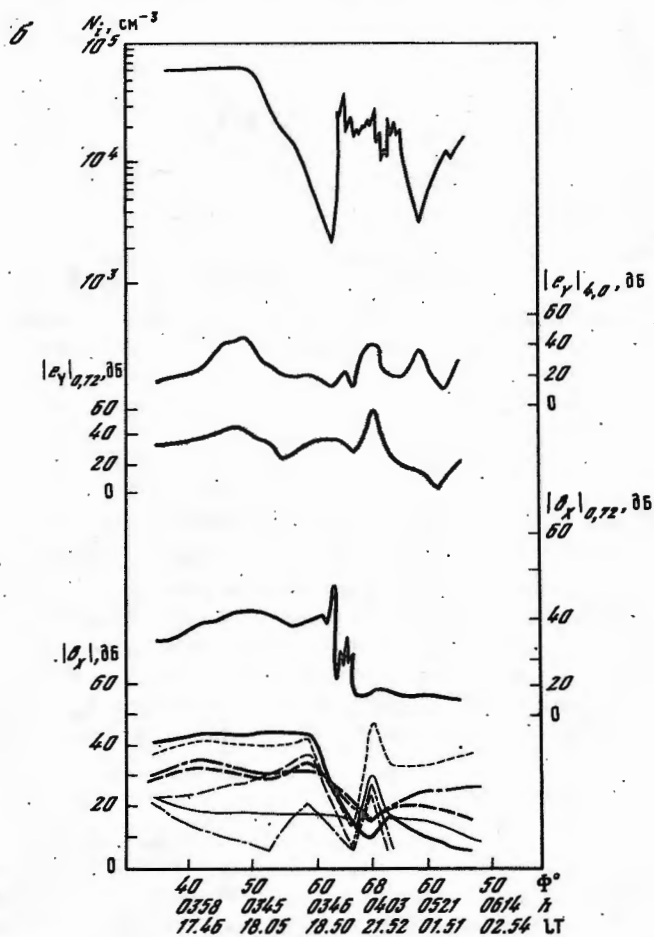
алам ИСЗ  
амплитуд маг-  
в связи с из-

проводились  
едствие ква-

ации  $N_e$ .

Пусть плоскость  $XOY$  координатной системы спутника перпендикулярна его продольной оси. Используемая для измерения ОНЧ- и КНЧ-излучений магнитная рамка и электрический диполь на этом спутнике ориентированы таким образом, что регистрировались проекции на ось  $OX$  магнитной ( $b_X$ ) и на  $OY$  электрической ( $e_Y$ ) компонент поля излучений. Кроме широкополосной аналоговой регистрации ОНЧ- и КНЧ-излучений проводились измерения амплитуд  $|b_X|$  и  $|e_Y|$  на частоте 0,72 кГц ( $\Delta f = 95$  Гц) и  $|e_Y|$  на частоте 4 кГц ( $\Delta f = 500$  Гц). В приемнике магнитной компоненты имелся еще спектроанализатор с каналами, настроенными на частоты 0,17; 0,32; 0,5; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 8,0; 10,0 и 12,5 кГц. Полоса пропускания каждого канала составляла  $\Delta f = 0,125f_0$ . Каналы спектроанализатора опрашивались с периодом 2 мин 20 с. Каналы регистрации  $|e_Y|$  на частотах 4,0 и 0,72 кГц, а также один из каналов спектроанализатора ( $|b_X|$  на  $f = 0,72$  кГц) опрашивались значительно чаще — через 1/6 с. Некоторые подробности эксперимента на ИСЗ "Интеркосмос-14" даны в Приложении.

В декабре 1975 г. спутник в северном (зимнем) полушарии находился вечером и ночью на умеренных высотах 300–800 км, а в южном (летнем) полушарии — днем на высотах, больших 1500 км. В зависимости от долготы восходящего узла орбиты спутник в любом полушарии мог либо проникнуть в главный ионосферный провал, либо, пройдя через него, достигнуть полярной шапки.



0,17 кГц, штрихпунктирная линия — 0,32 кГц, штриховая — 0,5 кГц, сплошная жирная — 0,72 кГц, штриховая тонкая — 1,6 кГц, штрихпунктирная тонкая — 2,5 кГц, сплошная тонкая — 4 кГц

магнитной

ие). Пунктир —

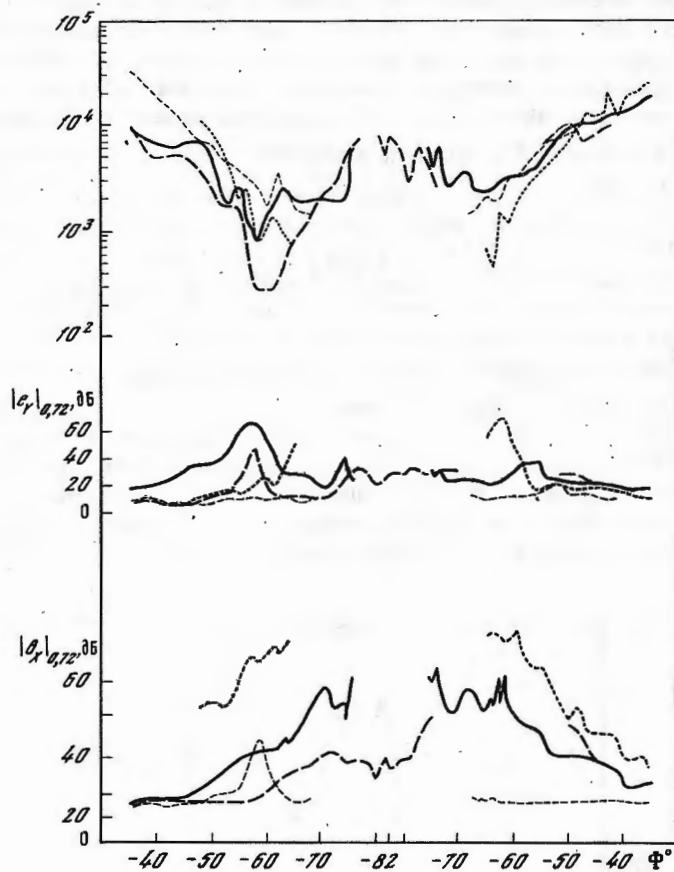


Рис. 4. Вариации концентрации плазмы ( $N_i$ ) и электрической и магнитной компонент поля на частоте 0,72 кГц на четырех витках ИСЗ "Интеркосмос-14" в южном полушарии

Сплошная линия — виток 3, 11. XII; штриховая — виток 4, 12. XII; пунктир — виток 11, 12. XII; точки — виток 69, 16. XII 1975 г.

На рис. 3 представлены типичные примеры вариаций величин  $N_i$ ,  $|E_y|$  и  $|B_x|$ , наблюдавшиеся 16. XII 1975 г. Соответствующие графики представлены в зависимости от инвариантной широты  $\Phi$ . На оси абсцисс отмечены также значения высоты спутника и местное время на спутнике. Рис. 3, а представляет явления в южном полушарии. Верхняя кривая передает изменения суммарной ионной концентрации  $N_i$ . На рисунке приведены данные, когда спутник находился на  $\Phi \approx -49^\circ$  и высоте 1680 км. Концентрация при этом составляла  $N_i = 1,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  и уменьшалась — спутник входил в провал. Минимальное значение концентрации в провале ( $N_i \approx 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ ) было зарегистрировано на широте  $\Phi = -64^\circ$  и высоте  $\approx 1600$  км. После этого концентрация увеличивалась и на широте  $\Phi \approx -35^\circ$  достигла  $N_i \approx 2,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  — спутник вышел из провала. Небольшой максимум  $N_i$  на  $\Phi = -63^\circ$  и высоте  $\sim 1700$  км может означать неглубокое проникновение спутника через высокоширотную границу провала. Разные части кривой  $N_i(\Phi)$  относятся к различным периодам местного времени — левая часть до минимума концентрации относится к раннему утру (06–09<sup>h</sup>LT), а правая часть — к полуденному и послеполуденному времени. Кроме того, высота спутника также изменялась. Вероятно, этому можно приписать некоторую асимметрию кривой  $N_i(\Phi)$ . Остальные графики на рис. 3, а представляют изменения амплитуды ОНЧ- и КНЧ-

Рис. 3.   
 нент п   
 ном п   
 а —   
 17. XII   
 излуч   
 ческо   
 Эти кр   
 ти ри   
 роана   
 менен   
  $|b_x|_0$ ,   
 ложен   
 1 мкВ   
 Со   
 центр   
 шеств

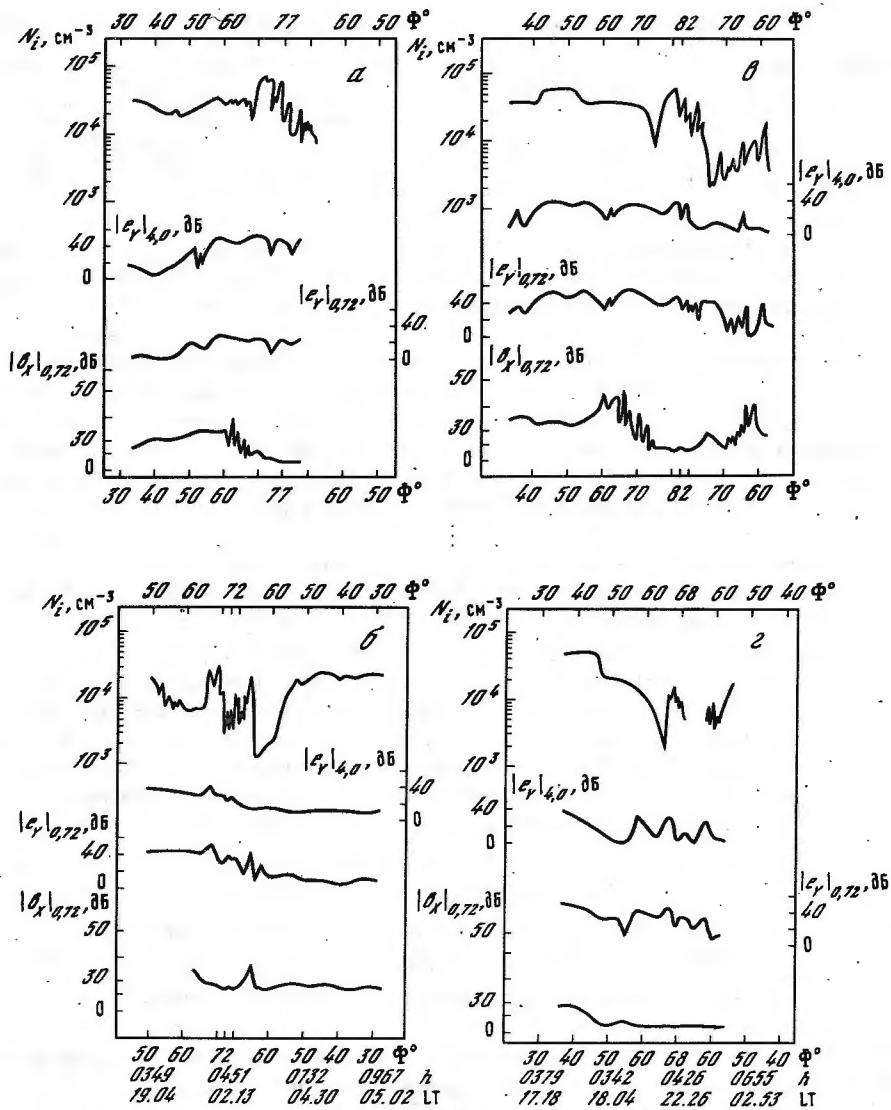


Рис. 5. Вариации концентрации плазмы ( $N_i$ ) и электрической и магнитной компонент поля на частоте 0,72 кГц на четырех витках ИСЗ "Интеркосмос-14" в северном полушарии

а — виток 5, 12. XII; б — виток 11, 12. XII; в — виток 74, 17. XII; г — виток 83, 17. XII 1975 г.

излучений. Кривые  $|e_\gamma|_4$  и  $|e_\gamma|_{0,72}$  относятся к измерениям амплитуды электрической компоненты, а кривая  $|b_\chi|_{0,72}$  — магнитной компоненты поля излучений. Эти кривые регистрировались с большой частотой опроса. Кривые в нижней части рисунка представляют изменения показаний некоторых других каналов спектроанализатора  $|b_\chi|$ . Так как эти показания опрашивались реже, то быстрые изменения амплитуды в них сглаживались. Это можно заметить, сравнив кривую  $|b_\chi|_{0,72}$  и соответствующую кривую в нижней части рисунка. По оси ординат отложены значения  $|e_\gamma|$  и  $|b_\chi|$  в децибелах относительно уровня соответственно  $1 \text{ мкВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  и  $4,5 \cdot 10^{-6} \gamma/\sqrt{\text{Гц}}$ .

Сопоставление разных графиков рис. 3, а показывает, что с понижением концентрации амплитуды магнитной и электрической компонент поля излучений существенно увеличиваются. На разных частотах вариация амплитуды в провале

различна, что легко установить, сравнивая кривые  $|e_Y|_4$  и  $|e_Y|_{0,72}$ , а также разные кривые в нижней части рисунка для магнитной компоненты. Изменения амплитуд в КНЧ-части спектра оказываются больше, чем на частотах ОНЧ. Можно обратить также внимание на заметные различия вариаций амплитуд магнитной и электрической компонент поля на одинаковых частотах. Так, например, максимум  $|b_X|_{0,72}$  шире, чем в кривой  $|e_Y|_{0,72}$ . Кроме того, на кривой  $|b_X|_{0,72}$  больше флуктуаций.

Рис. 3, б построен аналогично рис. 3, а и относится к северному полушарию, малым высотам и вечернему времени. В левой части графика  $N_i(\Phi)$  хорошо видно вхождение спутника в главный ионосферный провал, в интервале  $50 < \Phi < 60^\circ$  концентрация ионов уменьшается от  $6 \cdot 10^4$  до  $2 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup>. Затем концентрация резко увеличивается почти в 10 раз и далее вдоль самой высокоширотной части траектории спутника, в среднем медленно уменьшаясь, сильно флуктуирует. После того как спутник достиг инвариантной широты  $65^\circ$  в полуденном секторе, концентрация вновь резко уменьшилась, и начиная с  $\Phi \approx 60^\circ$  (520 км высоты) концентрация возрастала. Сеанс регистрации прекратился раньше, чем спутник вышел из провала. Высота спутника на рассматриваемом участке орбиты изменилась незначительно, всего лишь на  $\sim 150$  км. Можно полагать, что в этом случае спутник вечером пересек ионосферный провал и проник в авроральный пик концентрации ионосферной плазмы ( $\Phi > 62 \pm 65^\circ$ ). Значительные флуктуации  $N_i$  характерны для этой области ионосферы [7, 8].

Изменения амплитуды низкочастотных излучений в этом случае существенно отличаются от того, какими они были в южном полушарии (см. рис. 3, а). Можно отметить некоторый рост  $|e_Y|_4$  на экваториальной границе провала, что совпадает с областью расположения SAR (см. § 2). В магнитной компоненте поля этот рост выражен меньше. Участкам минимальных концентраций нельзя сопоставить каких-либо особенностей в кривых амплитуды поля. Зато вхождение спутника в авроральный пик отмечается минимумом всех спектральных компонент  $|b_X|$ <sup>1</sup>.

Повышенным значениям  $N_i$  в авроральном пике соответствуют максимумы амплитуд  $|e_Y|_4$ ,  $|e_Y|_{0,72}$  и всех компонент  $|b_X|$  в ОНЧ-диапазоне (в КНЧ-диапазоне только на частоте 0,170 кГц так же хорошо заметен этот максимум).

Описанные вариации величин  $N_i$ ,  $|e_Y|$  и  $|b_X|$  характерны для большинства прохождений спутника "Интеркосмос-14" через ионосферный провал. На рис. 4 и 5 сопоставлены соответствующие графики для разных витков в южном (рис. 4) и северном (рис. 5) полушариях. Из-за обилия флуктуаций на рис. 5 данные по различным виткам не наложены друг на друга, а изображены отдельно.

На графиках рис. 4 можно узнать все особенности, обсуждавшиеся в связи с рис. 3, а. Из них главной является значительный рост амплитуды  $|e_Y|$  и  $|b_X|$  при вхождении спутника в главный ионосферный провал. Из четырех прохождений, показанных на рис. 4, в двух случаях спутник на высокоширотной части траектории проник в авроральный пик (3-й виток 11. XII и 4-й виток 12. XII 1975 г.).

На 4-м витке (штриховая линия) в высокоширотном районе ( $\Phi > 70^\circ$ ) можно обнаружить увеличение концентрации ионов, увеличение амплитуды электрической компоненты и некоторое уменьшение амплитуды магнитной компоненты поля излучений. Это в общем согласуется с эффектами, показанными на рис. 3, а. К сожалению, правая часть кривых, относящихся к 4-му витку, имеет разрыв из-за калибровки, так что в этом случае нельзя рассмотреть детали вхождения в провал.

На витке 3 (сплошная кривая на рис. 4) спутник неглубоко проник в авроральный пик. На этом витке следует еще обратить внимание на узкий максимум, на-

<sup>1</sup> В записи  $|b_X|_{0,72}$ , сделанной с большим временным разрешением, пересечение полярной границы провала отмечено значительной флуктуацией, которая совпадает с началом флуктуаций концентрации в авроральном пике. Эта флуктуация незаметна в соответствующей кривой в нижней части рис. 3, б, сглаженной из-за редкого опроса.

блюдаемь  
Не исклю  
наблюдаю  
ионизации  
случаях,  
полудня.  
лучше все  
рис. 4, ко  
жен либо  
Обрат  
ному врем  
ленные на  
заметно н  
тером кри  
суток и р  
ных на ри  
обсуждави

Между  
электром  
Максвелл

$\text{rot } \vec{e} =$

Из этого  
чить [29]

$\frac{|\vec{b}|}{|\vec{e}|}$

где  $\omega_0$  —  
ная частот  
полем. И  
электрич  
ции плазм

$|\vec{b}|/|\vec{e}|$

При реги  
может ин  
возбужда  
лагать, ч  
тарного  
из-за нес

Рассм  
магнитн  
Структур  
сложна,  
ние може

<sup>1</sup> Указани  
шений в  
КНЧ-во.



блюдаемый одновременно на кривых  $N_i$ ,  $|e_Y|_{0,72}$  и  $|b_X|_{0,72}$  при  $\Phi = -(73+74^\circ)$ . Не исключено, что здесь спутник прошел вблизи полуденного клефта, где обычно наблюдаются потоки малоэнергичных частиц, способных вызывать повышение ионизации и интенсивности низкочастотных излучений. К сожалению, в других случаях, представленных на рис. 4, спутник не проходил через эту широту вблизи полудня. Клефт образует узкую по широте полосу, вытянутую вдоль долготы, и лучше всего выражен вблизи полуденного меридиана. В левой части графиков рис. 4, которые относятся к раннему времени, клефт, по-видимому, слабо выражен либо вообще отсутствует.

Обратим еще внимание на плавный ход кривых на рис. 4, относящихся к дневному времени и большим высотам. В противоположность этому кривые, представленные на рис. 5 (ночь, малые высоты), изобилуют флуктуациями. Это особенно заметно на высокоширотных участках кривых  $N_i$ . Такое различие между характером кривых на рис. 4 и 5, по-видимому, можно приписать различному времени суток и различной высоте спутника. Что касается разных проходов, показанных на рис. 5, то во всех случаях можно без труда установить характерные черты, обсуждавшиеся ранее в связи с рис. 3, б.

#### 4. ОТНОШЕНИЕ МАГНИТНОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛЯ ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА

Между индукцией магнитного поля и напряженностью электрического поля электромагнитной волны существует соотношение, определяемое уравнением Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{e} = \frac{-\partial \vec{b}}{\partial t} \quad (4)$$

Из этого уравнения, в частности, для плоских волн в ОНЧ-диапазоне легко получить [29]

$$\frac{|\vec{b}|}{|\vec{e}|} \sim \frac{\omega_0 e \sqrt{\lambda(|\cos\theta| - \lambda)}}{\omega_{Be} (1 - \lambda|\cos\theta|) \left\{ 1 + \lambda^2 \frac{\sin^2\theta + (|\cos\theta| - \lambda)^2}{(1 - \lambda|\cos\theta|)^2} \right\}^{1/2}} \quad (5)$$

где  $\omega_0 e$  и  $\omega_{Be}$  — плазменная и гирочастота электронов,  $\lambda = \omega/\omega_{Be}$  — нормированная частота волны и  $\theta$  — угол между нормалью к фронту волны и геомагнитным полем. Из последней формулы следует, что отношение амплитуд магнитного и электрического векторов волны пропорционально корню квадратному из концентрации плазмы:

$$|\vec{b}|/|\vec{e}| \sim \sqrt{N_e} = \sqrt{N_i} \quad (6)$$

При регистрации волн во внешней ионосфере аппаратура, установленная на ИСЗ, может иногда оказаться внутри или в непосредственной близости от области, где возбуждаются волны. Структура поля волн в этой области неизвестна. Можно полагать, что существует аналогия между структурой поля в ближней зоне элементарного излучателя (диполя) и в окрестности области, где возбуждаются волны из-за неустойчивости плазмы.

Рассмотрение структуры сферической волны, излучаемой электрическим или магнитным диполем в магнитоактивной плазме [32, 33], также приводит к (6)<sup>1</sup>. Структура ближнего поля дипольного излучателя в магнитоактивной плазме очень сложна, но и там справедливо  $|\vec{b}|/|\vec{e}| \sim n$ , хотя в отдельных случаях это отношение может быть пропорционально  $(\sqrt{N_e})^a$ , где  $a > 1$ .

<sup>1</sup> Указанные свойства имеют достаточно общий характер и вытекают из соотношений размерности  $[b] = \frac{1}{v_\Phi} [e] = \frac{n}{c} [e]$ . Коэффициент преломления для ОНЧ- и КНЧ-волн  $n \sim \sqrt{N_e}$ .

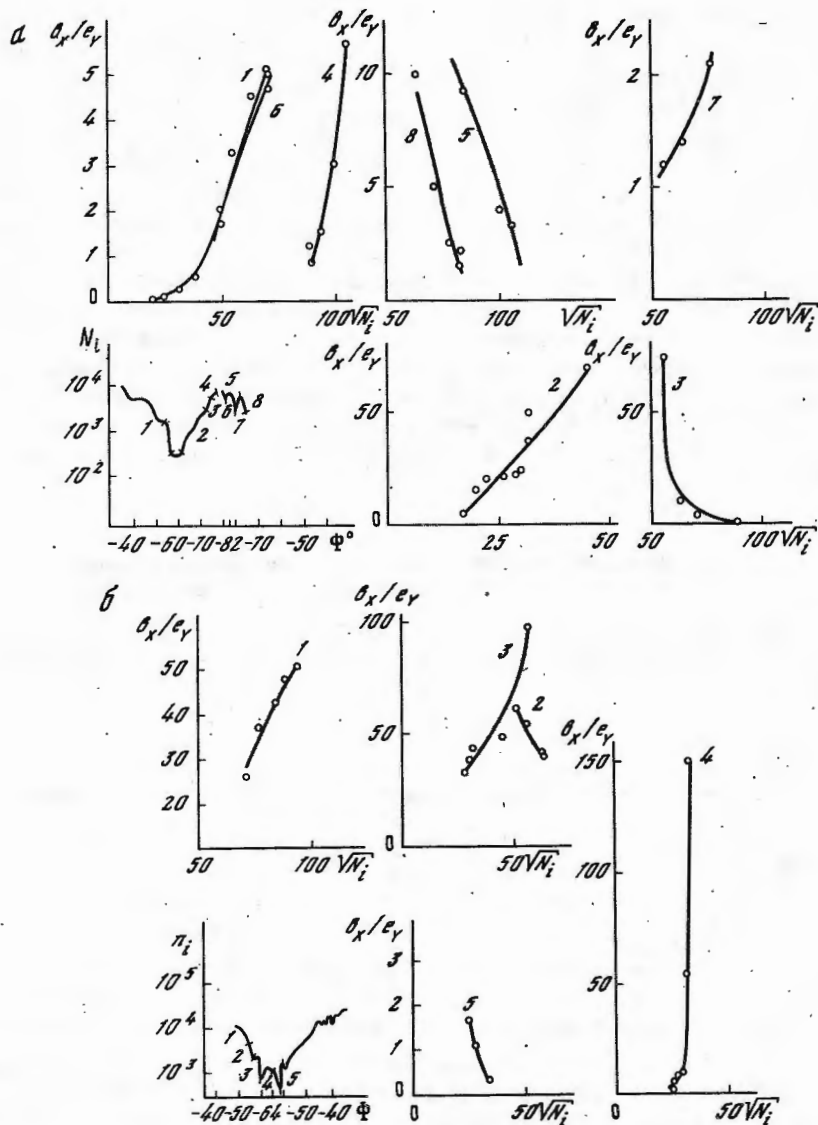


Рис. 6. Зависимость  $|b_X|/|e_Y|$  от концентрации ( $\sqrt{N_i}$ ) для прохождений спутника "Интеркосмос-14" через область главного ионосферного провала (южное полушарие)

а - виток 4, 12. XII; б - виток 69, 16. XII 1975 г.

В [29] показано, что отношение амплитуд любых составляющих полей  $\vec{B}$  и  $\vec{E}$  в плоской волне также пропорционально коэффициенту преломления. Что касается коэффициента пропорциональности, то он зависит не только от  $\omega$ ,  $\omega_{pe}$  и  $\theta$ , как в (5), но и от ориентации спутника в координатной системе волны, где  $(\vec{k} = \{k \sin \theta; 0; k \cos \theta\})$ .

Располагая одновременно измеренными значениями амплитуд магнитной  $|b_X|$  и электрической  $|e_Y|$  составляющих поля электромагнитной волны в координатной системе спутника, можно составить их отношение  $|b_X|/|e_Y|$  и сравнить его с изменениями концентрации плазмы. При этом следует ожидать, что соответствующие отношения будут возрастать с увеличением концентрации.

На рис. 6 представлены графики зависимости  $|b_X|/|e_Y|$  (ось ординат) от  $\sqrt{N_i}$  (ось абсцисс) для прохождений спутника "Интеркосмос-14" через область главно-

го ионс-  
график  
компо  
не тол  
траект

Одн  
конце  
цифич  
ветств  
чувств  
их отно  
их отно

Не  
странс  
можно  
от  $N_i$ .  
имеют

Обн  
ческой  
яснить

одновр  
том об  
больше  
устано  
магнит  
(углам  
 $|b|/|e|$   
электр  
ненты,  
сопост  
ведлив  
ным, е  
тории

Сол  
сферно  
измен  
провал  
шениен  
нижня  
тельст  
ра шум  
ют эле  
близка  
Исход  
ионов.  
ионосф  
растет  
массы  
ионов,  
Получ  
как по  
даемой  
нейшен  
лись б

Ан  
ного п

го ионосферного провала на 4-м и 69-м витках (южное полушарие). Как видно из графиков, в большинстве случаев подтверждается ожидаемый рост отношения компонент поля с увеличением концентрации. Такая зависимость наблюдается не только в большем числе случаев, но также и на более протяженных участках траектории спутника (см. графики изменений  $N_i$ , также приведенный на рис. 6).

Однако на отдельных участках траектории  $|b_X|/|e_Y|$  уменьшается с ростом концентрации. Уменьшение  $|b_X|/|e_Y|$  с ростом  $N_e$  не вызвано каким-либо специфическим характером записей величин  $|b_X|$  или  $|e_Y|$ . Во всех случаях соответствующие величины достаточно велики и значительно превосходят пороговую чувствительность приемников. Вид записи величин  $|b_X|$  и  $|e_Y|$  на участках, где их отношение уменьшается с ростом  $N_i$ , не отличается от других участков, где их отношение возрастает.

Не удалось также обнаружить каких-либо специфических особенностей в пространственных изменениях концентрации плазмы (градиенты и т. п.), которые можно было бы связать с обнаруженными особенностями зависимости  $|b_X|/|e_Y|$  от  $N_i$ . Можно указать, разве, на то, что соответствующие участки траектории имеют некоторую тенденцию группироваться ближе к полярной границе провала.

Обнаруженный эффект уменьшения отношения амплитуд магнитной и электрической составляющих полей  $|b_X|/|e_Y|$  при увеличении концентрации можно объяснить лишь предполагая, что на соответствующих участках траектории спутника одновременно регистрировались две волны существенно разного характера. В том обстоятельстве, что на спутнике одновременно могут приниматься две и большее число волн, имеющих разные источники, нет ничего необычного. Легко установить, однако, что в том случае, когда принимаются две плоские электромагнитные волны, отличающиеся амплитудой и направлением распространения (углами  $\theta$ ), сумма их также будет плоской волной. В этом случае отношение  $|b|/|e|$  выразится также формулой типа (5). Если же одна из принимаемых волн электромагнитная, а другая электростатическая, не имеющая магнитной компоненты, то в этом случае напряженности магнитного и электрического полей несопоставимы и все выкладки, приводящие к указанным выше формулам, несправедливы. Отступление от приведенных формул может быть особенно значительным, если допустить, что электростатическая волна возбуждается вблизи траектории ИСЗ.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместное рассмотрение позволило установить, что в области главного ионосферного провала имеется тесная связь характеристик ОНЧ- и КНЧ-излучений с изменчивостью концентрации. Обычно на экваториальной границе ионосферного провала наблюдается полоса ОНЧ-шумов. По мере вхождения в провал с уменьшением концентрации плазмы и повышением температуры электронов понижается нижняя граничная частота полосы шумов. Имеются экспериментальные свидетельства увеличенной напряженности электрического поля в нижней части спектра шумов [34]. Эти свойства дают основание предположить, что такие шумы имеют электростатическую природу и что нижняя граничная частота их спектра очень близка или совпадает с локальной величиной нижней гибридной частоты плазмы. Исходя из этого предположения были выполнены расчеты эффективной массы ионов. Оказалось, что достаточно часто  $m_{эф}$  растет при пересечении главного ионосферного провала вечером и ночью. На малых высотах ( $\sim 500-600$  км)  $m_{эф}$  растет особенно сильно и в экстремальных случаях достигает 25 единиц атомной массы. Этот результат в общем соответствует представлениям о провале легких ионов, часто наблюдающемся одновременно с главным ионосферным провалом. Получаемые разумные величины  $m_{эф}$  и их изменчивость можно рассматривать как подтверждение исходного предположения о том, что нижняя граница наблюдаемой полосы шумов весьма близка к нижней гибридной частоте плазмы. В дальнейшем целесообразно провести эксперимент, в котором одновременно проводились бы измерения концентрации, масс-спектрометрические и волновые.

Анализ вариаций амплитуды КНЧ- и ОНЧ-излучений в зоне главного ионосферного провала показал, что на высотах, больших 1000 км, днем чаще всего амплитуды

спутника  
полу-

$\vec{b}$  и  $\vec{e}$   
касает-  
и  $\theta$ ,  
 $\vec{e}$  ( $\vec{k} =$

ной  $|b_X|$   
динат-  
ить его  
ответст-

от  $\sqrt{N_i}$   
главно-

туда как магнитной, так и электрической компонент поля значительно увеличивается в области, где концентрация плазмы минимальна. При этом оказалось, что зависимость от концентрации плазмы отношения амплитуд магнитной и электрической составляющих поля КНЧ-излучений свидетельствует об электромагнитном характере соответствующих волн. Лишь в отдельных небольших участках траектории амплитуды магнитной и электрической компонент оказываются несопоставимы. Можно предположить, что в этих областях имеется значительная примесь электростатических волн, по-видимому, локального происхождения.

На сравнительно малых высотах (< 800 км) ночью записи амплитуд излучений и вариации  $N_i$  имеют очень сложный характер. Здесь зачастую амплитуда электрической компоненты поля оказывается заметно больше, чем магнитной. Соответствующие вариации в этих условиях должны быть подвергнуты детальному анализу на большем экспериментальном материале. Значительная амплитуда электрической компоненты в минимуме концентрации на малых высотах, по-видимому, даёт основание для предположения о том, что на малых высотах особенно велика вероятность возбуждения в КНЧ-диапазоне электростатических колебаний.

Авторы выражают глубокую благодарность специалистам ГДР К. Вагнеру, Х. Леману и А. Бесту за предоставленные данные по электронной концентрации и температуре ИСЗ "Интеркосмос-10".

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андронов А.А., Трахтенгерц В.Ю. – Геомагнетизм и аэрoномия, 1964, 4, с. 233.
2. Kennel C.F., Petschek H.E. – J. Geophys. Res., 1966, 71, p. 1.
3. Hughes A.R.W., Gibbons W., Tulunay Y. Medium latitude ELF and VLF emissions and the mid-latitude trough in electron density: Paper presented at the 1974 STP Symposium in Sao-Paulo, Brazil, p. 257.
4. Bettac D., Gladevich G.L., Gubski V.F. et al. – COSPAR Space Res. Berlin, 1976, 16, p. 575.
5. Muldrew D.B. – J. Geophys. Res., 1965, 70, p. 2635.
6. Schunk R.W., Banks P.M., Raitt W.S. – J. Geophys. Res., 1976, 81, p. 3271.
7. Carpenter D.L. – J. Geophys. Res., 1966, 71, p. 693.
8. Serafimov K.B., Kutiev I.S., Bochev A.Z. et al. – Space Res., 1976, 16, S. 465.
9. Brace L.H., Reddy B.M. – J. Geophys. Res., 1965, 70, p. 5783.
10. Miller N.J. – J. Geophys. Res., 1974, 79, p. 3795.
11. Chandra S., Maier J.R., Troy B.E. Jr, Narashida B.C. – J. Geophys. Res., 1971, 76, p. 920.
12. Cornwell J.M., Coronity F.V., Thorn R.M. – J. Geophys. Res., 1971, 76, p. 4428.
13. Clark D.H., Raitt W.J. – Planet. and Space Sci., 1976, 24, p. 873.
14. Sagalyn R.C., Smiddy M., Ahmed M. – J. Geophys. Res., 1974, 79, p. 4252.
15. Banks P.M., Douppnik J.P. – Planet. and Space Sci., 1974, 27, p. 79.
16. Jelly D.H., Petrié L.E. – Proc. IEEE, 1969, 57, N 6, p. 1005.
17. Rycroft M.J., Thomas J.O. – Planet. and Space Sci., 1970, 18, p. 65.
18. Грингауз К. Исследования по геомагнетизму, аэрoномии и физике Солнца, 1972, вып. 23, с. 272.
19. Park G.G. – J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 3825.
20. Chappel C.R. – Trans. Amer. Geophys. Union, 1974, 55, p. 8.
21. Cerisier J.C. Une interpretation des emissions au voisinage de la frequence hybride basse excitees par des sifflements. – C. r. Acad. sci. Paris, 1968, 267, p. 1373.
22. Вернова Л.В., Войта Я., Иржичек Ф. и др. – Космич. исслед., 1972, 10, с. 82.
23. Cerisier J.C. – J. Atmos. and Terr. Phys., 1973, 35, p. 77.
24. Laaspere T. – J. Geophys. Res., 1969, 74, p. 141.
25. Laaspere T. – J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 97.
26. Storey O., Cerisier J.C. Une interpretation des landes de bruit an voisinage de la frequence hybride basse observes an moyen de satellites artificiels. – C. r. Acad. sci. Paris, 1968, 266, p. 525.
27. Трахтенгерц В.Ю., Шапаев В.И. – Изв. вузов. Радиофизика, 1977, 20, № 7, 827.
28. Гдалевич Г.Л., Губский В.Ф., Лихтер Я.И. и др. Связь изменений электронной концентрации и температуры ионосферной плазмы с вариациями ОНЧ-спектра в сред-

ачительно увеличи-  
и этом оказалось,  
уд магнитной и элект-  
т об электромагнит-  
больших участках  
т оказываются не-  
еется значительная  
происхождения.  
и амплитуд излучений  
тую амплитуда элект-  
м магнитной. Соот-  
гнуты детальному  
ельная амплитуда  
ных высотах, по-ви-  
алых высотах особен-  
статических коле-

и ГДР К. Вагнеру,  
онной концентрации

эрономия, 1964, 4, с. 233.

р. 1.  
ELF and VLF emissions  
at the 1974 STP Sympo-

Space Res. Berlin, 1976,

976, 81, p. 3271.

Res., 1976, 16, S. 465.  
3.

- J. Geophys. Res., 1971,

Res., 1971, 76, p. 4428.  
873.

974, 79, p. 4252.  
7, p. 79.

8, p. 65.

Физике Солнца, 1972,

la frequence hybride

8, 267, p. 1373.

исслед., 1972, 10, с. 82.

uit an voisinage de la fre-  
- С. г. Acad. sci. Paris,

изика, 1977, 20, № 7, 827.

изменений электрон-  
циями ОНЧ-спектра в сред-

них и высоких широтах. — В кн.: Труды Калуж. симп. соцстран по физике ионосферы, магнитосферы и солнечного ветра (20–27. IX 1976 г.). / Под ред. Г.Л. Гдалевича, С. Пинтера. Гурбанов, 1977.

29. Ахиезер А.И., Ахиезер И.А., Половин Р.В. и др. Электродинамика плазмы. М.: Наука, 1974. 719 с.

30. Михайлов Ю.М. Ионный состав, определяемый по измерениям нижнего гибридного резонанса и локальной электронной концентрации на ИСЗ. — В кн.: Физика и эмпирическое моделирование ионосферы. М.: Наука, 1976, с. 124.

31. Деминов М.Г., Михайлов Ю.М., Ситнов Ю.С., Фаткуллин Т.И. Аномальные широтные вариации ионного состава внешней ионосферы по данным спутника "Интеркосмос-10". — В кн.: Физика и эмпирическое моделирование ионосферы. М.: Наука, 1976, с. 133.

32. Arbell E., Felsen L.B. Theory of radiation from sources in anisotropic media, pt. II: Point source in infinite, homogenous medium. — In: Electromagnetic Theory and Antennas/ Ed. E.C. Jordan. Pergamon Press, 1963, part I, p. 421.

33. Беллюстин Н.С. — Изв. вузов. Радиофизика, 1978, 21, № 1, с. 22.

34. Михайлов Ю.М., Климов С.И., Савин С.П. Квазистатические КНЧ- и ОНЧ-электрические поля в области главного ионосферного провала. — Наст. кн., с. 93.