

## Фазовые вариации километровых радиоволн, сопутствовавшие воздействию на ионосферу мощного радиоизлучения

Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 14 января 2009 г.*

Обнаружены квазипериодические вариации фазы километровых радиоволн, сопровождавшие воздействие на ионосферу радиоизлучения удаленного на расстояние около 1000 км мощного станда “Сура”. Особенностью эксперимента было то, что квазипериодические возмущения возникали далеко за пределами диаграммы направленности антенны станда. Амплитуда фазовых вариаций достигала  $5 \div 6^\circ$ . Период этих вариаций равнялся длительности воздействия (5 мин) и продолжительности пауз (5 мин). По амплитуде фазовых вариаций оценена относительная амплитуда возмущений концентрации электронов. Она достигала 10 %. В фоновые дни среднеквадратичное отклонение фазовых флуктуаций не превышало  $0.5^\circ$ , относительные флуктуации концентрации электронов составляли  $1 \div 3\%$ . Наблюдаемый эффект не удается объяснить генерацией акустико-гравитационных волн периодическим нагревом ионосферной плазмы. Скорее всего, эффект связан с взаимодействием подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера.

### 1. Введение

Воздействие мощного радиоизлучения на околоземную плазму занимает видное место среди активных экспериментов в геокосмосе.

Обширные теоретические исследования в этом направлении были проведены В. Л. Гинзбургом и А. В. Гуревичем еще в 1950–1960 гг. [1, 2]. Их результаты детально описаны в монографиях [3-5].

Систематические экспериментальные исследования эффектов воздействия мощных радиоволн на околоземную плазму начались в 1961 г. в СССР и в 1970 г. в США [6-8]. Они с несколько меньшей интенсивностью продолжают и в настоящее время.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований за период 1970–1990 гг. суммированы в монографиях [5, 9-14], а также в ряде обзоров [7, 15-19] и в тематических выпусках [20, 21].

Цитируемые выше работы посвящены изучению возмущений, возникающих в пределах облучаемой мощным радиоизлучением области плазмы. Такие возмущения автор настоящей статьи назвал локализованными. Их размер порядка  $10 \div 100$  км. Он определяется в основном шириной диаграммы направленности антенны (ДНА).

Локализованные возмущения вызваны классическими механизмами нелинейности, к которым относятся нагревный, стрикционный и ионизационный механизмы [1-5].

В то же время под воздействием мощного радиоизлучения в геокосмосе возникает другой класс эффектов. Они связаны с взаимодействием подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ), с переносом возмущений на значительные расстояния [22-26]. Такие возмущения автором были названы крупномасштабными. Их характерный горизонтальный размер достигает  $1 \div 3$  тыс. км. В этом случае

мощное радиоизлучение выступает в качестве стимулятора процессов, подобных существующим в естественных условиях.

Впервые эффекты, стимулированные мощным радиоизлучением гектометрового диапазона, были обнаружены автором в сентябре 1972 г. (см. об этом кратко в [27]). Затем была поставлена серия целенаправленных экспериментов в средних и высоких широтах. Их отдельные результаты описаны в ряде работ (см., например, [27]).

Систематические экспериментальные исследования крупномасштабных возмущений начались весной 1983 г. после введения в строй на полигоне НИРФИ, расположенного вблизи г. Нижний Новгород, мощного стенда декаметрового диапазона “Сура”. Диагностика крупномасштабных возмущений осуществлялась при помощи средств, размещенных в Радиофизической обсерватории (РФО) Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (расстояние между полигоном и обсерваторией – 950 км). Для этой цели использовались излучающие вертикально вверх радар частичных отражений, ВЧ радар доплеровского зондирования, ионозонд, а также приемно-обрабатывающие системы для анализа радиошумов в диапазонах  $1 \div 30$ ,  $150$  и  $2000$  МГц и средства наклонного зондирования ионосферы в диапазоне частот  $3 \div 30$  кГц,  $1 \div 30$  МГц и др.

Для общего контроля космической погоды использовались данные сети ионозондов и магнетометров.

Ряд результатов наблюдения крупномасштабных возмущений описан в работах [27–33] и обзорах [22, 26, 34, 35].

Можно считать установленным, что крупномасштабные возмущения могут существенно влиять на характеристики радиоволн всех диапазонов, которые используются в системах телекоммуникаций, радиолокации и радионавигации. В ряде случаев такое влияние может быть достаточно большим и может привести к нежелательным последствиям.

Цель настоящей работы – изложение результатов наблюдений значительных фазовых вариаций сигналов километрового диапазона в системе точного времени и частоты, сопутст-

вовавших воздействию на ионосферу мощного радиоизлучения стенда “Сура”.

## 2. Средства и методы

Эксперимент проведен в дневное время 21–26 декабря 1987 г.

*Нагревный стенд “Сура”.* Воздействие на ионосферу осуществлялось 21–25 декабря 1987 г. с 07:00 до 09:00 и с 10:00 до 14:00 UT в циклическом режиме (5 мин – нагрев, 5 мин – пауза) немодулированной радиоволной обыкновенной поляризации на частоте  $f_1 = 5.828$  МГц (значение  $f_1$  было меньше критической частоты ионосферы, которая в ходе эксперимента изменялась от 6.1 до 6.4 МГц). Эффективная мощность системы  $P_1 G_1 \approx 300$  МВт, направление излучения – вертикальное. Здесь, как обычно,  $P_1$  обозначает мощность радиопередающего устройства,  $G_1$  – коэффициент усиления антенны.

Географические координаты стенда “Сура” следующие:  $56^\circ$  с. ш.,  $45^\circ$  в. д.

*Радар частичных отражений.* Радар включался за 1 ч до начала излучения мощного стенда и выключался через 1 ч после прекращения излучения. Работа велась на частоте  $f_1 \approx 2.05$  МГц, длительность импульса – 25 мкс, частота повторения импульсов – 1 Гц. Эффективная мощность  $P_2 G_2 \approx 10$  МВт.

Радар расположен в РФО (географические координаты:  $49.5^\circ$  с. ш.,  $36.3^\circ$  в. д.).

Частично-отраженные сигналы использовались для получения профилей электронной концентрации  $N(z)$  в диапазоне высот  $z \approx 70 \div 85$  км. При этом применялся алгоритм регуляризации [36]. Погрешность получения значений  $N$  не превышала  $10 \div 20$  %.

*Радиоприемное устройство.* Для приема и регистрации сигналов на частоте  $f = 50$  кГц станции ОМА, располагавшейся на территории бывшей Чехословакии, использовалось специализированное радиоприемное устройство в г. Харькове. Для изучения фазовых вариаций  $\Delta\phi$  сигналов точного времени и частоты измерялась пропорциональная им величина – временной сдвиг  $\Delta t$ . Как известно,

$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta t.$$

Оценивание  $\Delta\varphi$  выполнялось на интервале времени  $\tau = 1$  мин.

Стабилизация частоты осуществлялась при помощи рубидиевого стандарта частоты, для которого относительная нестабильность  $\sigma_f/f \approx (1 \div 2) \cdot 10^{-11}$ . Тогда для среднеквадратичных отклонений флуктуаций временного и фазового сдвигов имеем следующие соотношения:

$$\sigma_t = \tau \frac{\sigma_f}{f}, \quad \sigma_\varphi = 2\pi\tau\sigma_f.$$

Оценки дают  $\sigma_t = 0.6 \div 1.2$  нс,  $\sigma_\varphi \approx 0.19 \div 0.38$  мрад  $\approx 0.01 \div 0.02^\circ$ .

*Ионозонд. Магнитометр.* Эти устройства использовались для общего контроля состояния космической погоды. В период измерительной кампании существенные возмущения ионосферы и геомагнитного поля отсутствовали.

### 3. Результаты экспериментов

*Вариации фазы в спокойных условиях.* В качестве фонового дня использовался день 26 декабря 1987 г. Стенд “Сура” в этот день не излучал.

Результаты измерения временных вариаций фазы после удаления медленных суточных изменений приведены на рис. 1 (верхняя панель). Из рисунка видно, что фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  испытывает случайные флуктуации. При этом среднеквадратичное отклонение фазы  $\sigma_\varphi$  составляет  $0.2 \div 0.5^\circ$  ( $\sigma_t \approx 11 \div 28$  нс). Интервал автокорреляции флуктуаций фазы  $\tau_c \approx 7 \div 9$  мин.

*Вариации фазы в возмущенных мощным радиоизлучением условиях.* Временные вариации фазы сигнала после удаления медленных суточных изменений показаны на рис. 2 (верхняя панель). Видно, что через время  $\Delta t \approx 15$  мин после начала воздействия на ионосферу появились квазипериодические вариации фазы. Спустя время  $\Delta t_2 \approx 40$  мин произошел сбой квазипериодических колебаний, через несколько минут они возникли вновь

с иной начальной фазой и несколько большей (до  $5 \div 6^\circ$ ) амплитудой.

Квазипериодические колебания продолжались в течение примерно 40 мин и после выключения мощного радиоизлучения. Затем опять имел место сбой колебания с задержкой  $\Delta t_3 \approx 45$  мин, отсчитываемой от момента выключения стенда “Сура”.

В 10:00 стенд вновь включился. И опять примерно через 15 мин произошло кратковременное усиление колебаний. Через 40 мин после включения стенда “Сура” амплитуда колебаний существенно увеличилась (до  $4^\circ$ ); увеличение амплитуды наблюдалось более 2 ч.

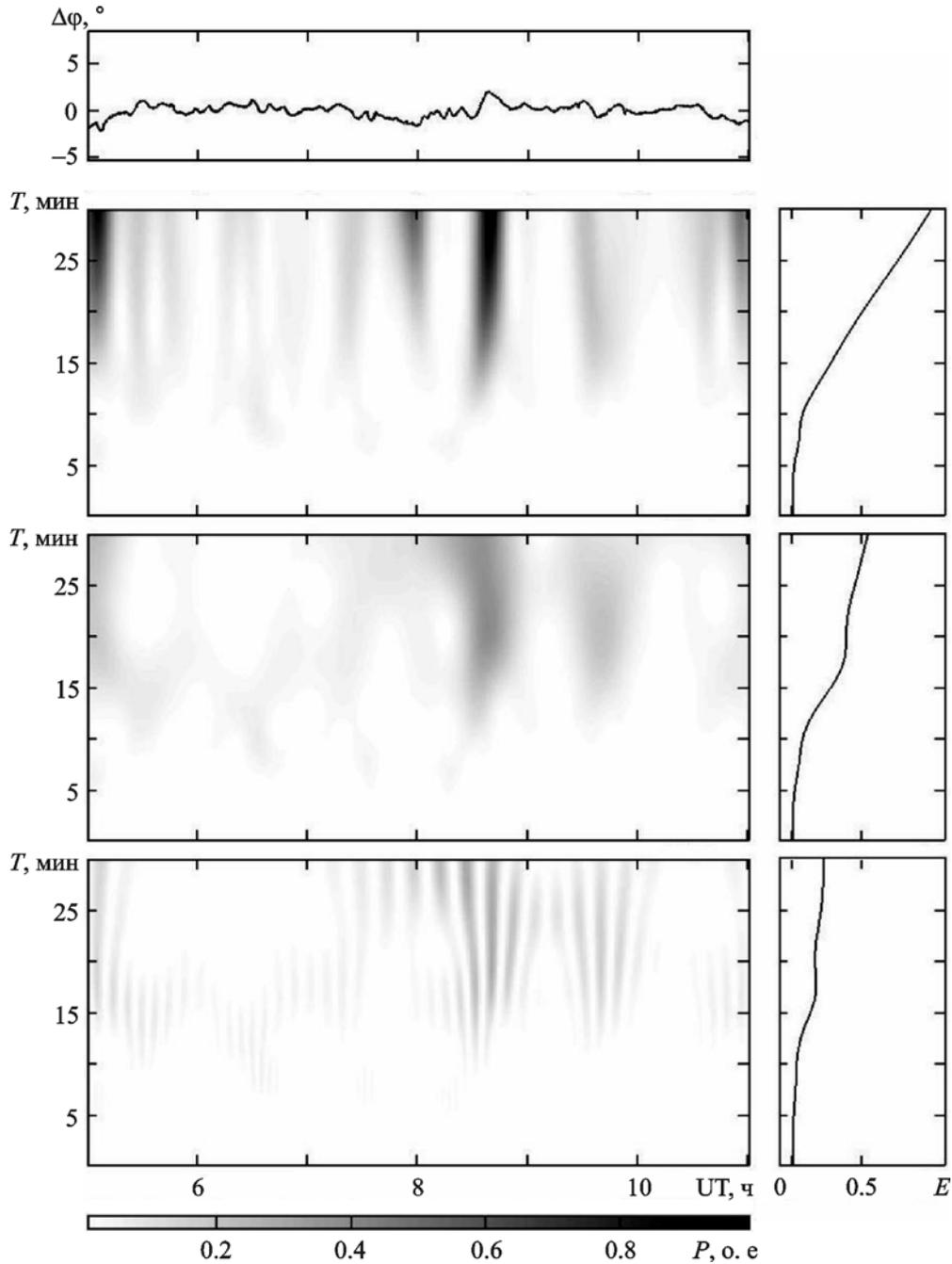
Добавим, что за 2 ч до включения мощного радиоизлучения значения  $\sigma_\varphi$  не превышали нескольких десятых долей градуса, т. е. были такими же, как и в фоновый день. Интервал автокорреляции флуктуаций фазы при этом в среднем составлял около  $7 \div 8$  мин.

Заметим, что 21–24 декабря 1987 г. поведение  $\Delta\varphi(t)$  в целом было подобным, но амплитуда колебаний не превышала  $1^\circ$  (56 нс).

### 4. Результаты спектрального анализа

Для спектрального анализа зависимостей  $\Delta\varphi(t)$  использовалось оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и аналитическое вейвлет-преобразование (АВП) на основе вейвлета Морле. Методика анализа и формат представления были такими же, как и в работах [37–39]. Кроме время-периодных зависимостей (динамических спектров), анализировались также энергограммы, т. е. распределение энергии сигнала по периодам. Результаты этого анализа показаны на рис. 1, 2.

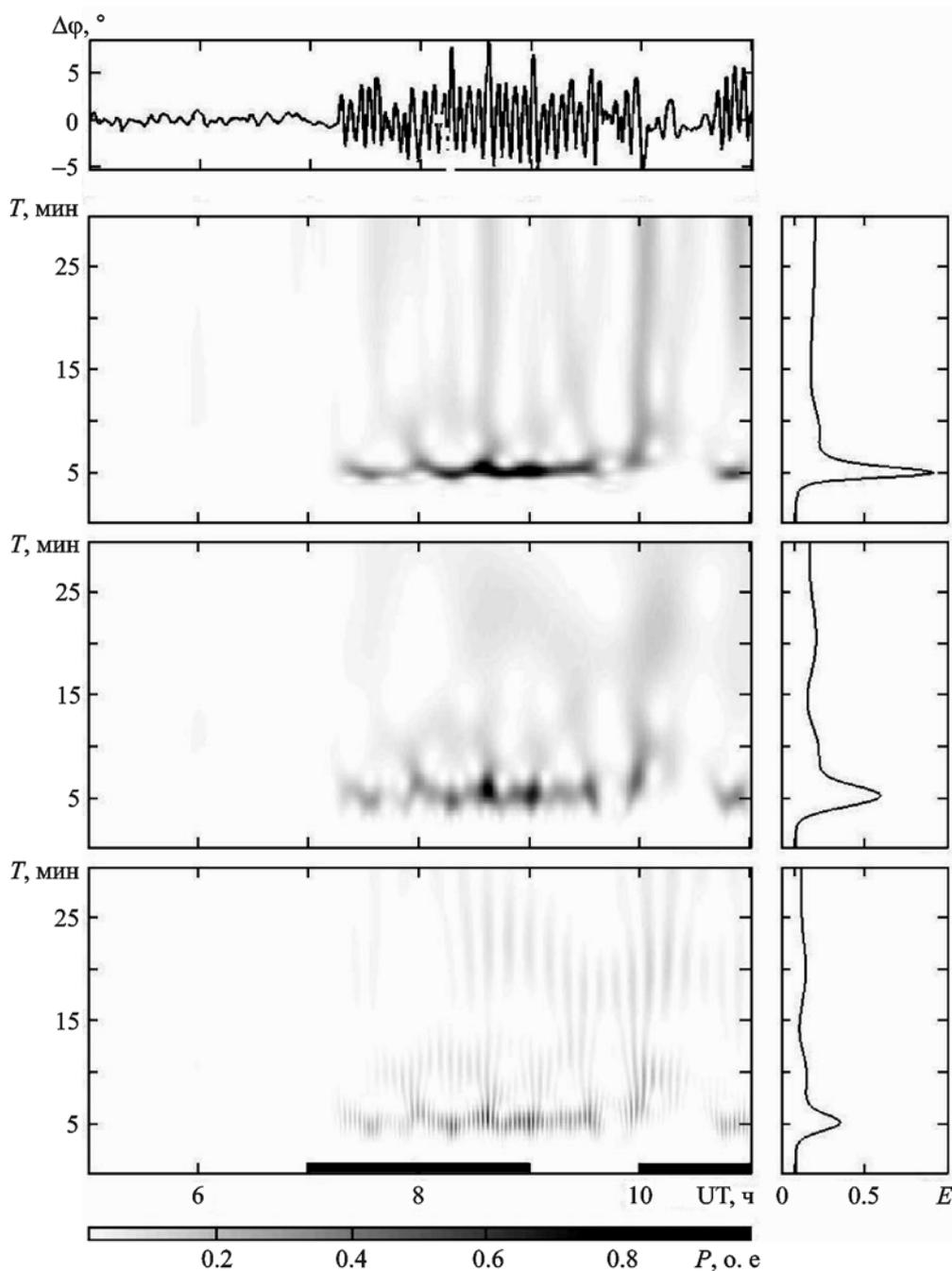
*Спектры сигнала и энергограммы в спокойных условиях.* Как видно из рис. 1, спектры ОПФ, АПФ и АВП содержали, вообще говоря, все периоды  $T$  – от единиц до 30 мин. В отдельные моменты времени появлялись волновые пакеты, состоящие из  $1 \div 1.5$  колебаний. Им соответствовали периоды  $15 \div 30$  мин. Длительность таких пакетов обычно не превышала  $15 \div 30$  мин. В целом спектральный анализ свидетельствует о хаотическом поведении зависимости  $\Delta\varphi(t)$ .



**Рис. 1.** Временные вариации фазы радиоволны в фоновый день 26 декабря 1987 г. (верхняя панель), результаты ОПФ, АПФ и АВП (панели сверху вниз) и соответствующие энергограммы (справа). Параметр  $P$  описывает относительную мощность спектральных составляющих,  $E$  – их энергию

Спектры сигнала и энергограммы в возмущенных условиях. Примерно через 15 мин после начала излучения мощного стенда в спектрах появились составляющие с периодом  $T = 5$  мин,

а также существенно менее выраженные составляющие с периодами 10 и 20 мин. Энергия последних была соответственно в 4 и 5 раз меньше энергии составляющей с  $T = 5$  мин.



**Рис. 2.** То же, что на рис. 1, в день возмущения околоземной среды мощным радиоизлучением 25 декабря 1987 г. Циклы нагрева показаны на временной оси жирными полосами

### 5. Результаты расчетов

*Общие соотношения.* Длина радиотрассы  $R$  станция ОМА – Харьков составляла около 1100 км. Распространение радиоволн

с частотой 50 кГц (длина волны  $\lambda = 6$  км) происходит в волноводе Земля – ионосфера. Действительно, даже на расстоянии от радиопередающего устройства  $R = 100$  км “тол-

щина” радиолуча, определяемая радиусом  $r_F$  первой зоны Френеля,

$$d = 2r_F = 2\sqrt{\lambda R}$$

и составляет около 50 км. Значение  $d$  оказалось близким к высоте нижней границы ионосферы  $z_0$  и толщине D-области ионосферы  $\Delta z_L$ , где происходит отражение километровых радиоволн.

На расстоянии, равном половине “скачка”  $R/2 \approx 550$  км, значение  $d \approx 115$  км, т. е. существенно больше  $\Delta z_0$  и  $\Delta z_L$ .

Изменения фазы  $\Delta\varphi$  радиоволны при распространении зависят от длины трассы, высоты отражения  $z_r$ , радиуса Земли  $R_0$ , длины радиоволны и вариаций высоты отражения радиоволны  $\Delta z$ . При этом [40]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi R}{\lambda} \left( \frac{z_r}{2R_0} + \frac{\lambda^2}{16z_r^2} \right) \frac{\Delta z}{z_r}. \quad (1)$$

Для  $\lambda = 6$  км второе слагаемое в скобках выражения (1) намного меньше первого. Тогда

$$\Delta\varphi \approx \pi \frac{R}{R_0} \frac{\Delta z}{\lambda}, \quad (2)$$

т. е.  $\Delta\varphi$  не зависит от  $z_r$ .

*Фазовые вариации, вызванные случайными неоднородностями.* При наличии случайных неоднородностей вдоль трассы радиоволны соотношение (2) принимает вид:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{R_0\lambda} \int_0^R \Delta z(R') dR'.$$

Дисперсия флуктуаций фазы

$$\sigma_\varphi^2 = \overline{\Delta\varphi^2} = \left( \frac{\pi}{R_0\lambda} \right)^2 \int_0^R \int_0^R \overline{\Delta z(R') \Delta z(R'')} dR' dR''. \quad (3)$$

(Черта сверху, как обычно, означает статистическое усреднение.)

В выражении (3)  $\overline{\Delta z(R') \Delta z(R'')} = K(R', R'')$  – корреляционная функция флуктуаций высоты отражения.

Флуктуации фазы радиоволны вызваны движением случайных неоднородностей концентрации электронов  $N$ . Максимальный горизонтальный размер этих неоднородностей  $l_{\max}$  в статистически однородной ионосфере примерно равен 100 км [41]. Это означает, что  $l_{\max} \ll R$ . При этом можно считать, что в соотношении (3)

$$\int_0^R K(R', R'') dR'' = \int_0^R K(R' - R'') dR'' \approx \sigma_z^2 l_{\max}, \quad (4)$$

где  $\sigma_z^2$  – дисперсия флуктуаций высоты отражений. С учетом (4) выражение (3) принимает вид:

$$\sigma_\varphi^2 = \left( \frac{\pi}{R_0\lambda} \right)^2 \sigma_z^2 R l_{\max}.$$

Отсюда

$$\sigma_\varphi = \pi \frac{\sqrt{R l_{\max}}}{R_0} \frac{\sigma_z}{\lambda}. \quad (5)$$

В невозмущенных условиях  $\sigma_\varphi \approx 0.2 \div 0.5^\circ$ . При этом, как следует из (5),  $\sigma_z \approx 0.13 \div 0.33$  км.

Зная  $\sigma_z$ , можно оценить значение

$$\tilde{\sigma}_N = \frac{\sigma_N}{N} = \left( \left( \frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right)^{1/2}.$$

Предположим, что в окрестности высоты отражения радиоволны профиль  $N(z)$  может считаться линейным, т. е.

$$N(z) = N(z_r) \left( 1 + \frac{z - z_r}{L} \right)$$

где  $L$  – характерный масштаб.

Из экспериментальных данных (см. табл. 1), полученных методом частичных отражений, оценим  $L$ . Оказывается, что  $L \approx 10$  км. Теперь из соотношения

$$\tilde{\sigma}_N = \sigma_z / L \tag{6}$$

вычислим  $\tilde{\sigma}_N$ . Значение  $\tilde{\sigma}_N$  составляет  $1.3 \div 3.3$  %. Примерно таким же оно было и в другие дни в период измерительной кампании.

*Фазовые вариации, вызванные квазипериодическим возмущением.* Предположим, что высота отражения изменяется по следующему закону:

$$\Delta z(t) = \Delta z_m \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

где  $T$  – период колебаний.

Тогда в соответствии с соотношением (2) амплитуда фазовых вариаций

$$\Delta \phi_m = \pi \frac{R}{R_0} \frac{\Delta z_m}{\lambda}. \tag{7}$$

При  $\Delta \phi_m = 5 \div 6^\circ$  из соотношения (7) получим  $\Delta z_m \approx 0.97 \div 1.16$  км, а из формулы, аналогичной (6),  $\delta_N = \Delta N_m / \bar{N} \approx \Delta z_m / L \approx 9.7 \div 11.6$  %.

В другие дни измерительной кампании  $\Delta z_m \approx 0.2$  км,  $L \approx 3 \div 11$  км и  $\delta_N \approx 2 \div 7$  %.

**Таблица 1.** Значения электронной концентрации, полученные методом частичных отражений 25 декабря 1987 г.

$z$ , км	72	75	78	81
$N$ , м <sup>-3</sup>	$4.8 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	$7.4 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^8$

## 6. Обсуждение

*Вариации фазы в спокойных условиях.*

При выключенном мощном стенде флуктуации фазы обусловлены движением случайных неоднородностей в нижней ионосфере. Их основные параметры следующие:  $l_{\max} \approx 100$  км,  $\tilde{\sigma}_N \approx 1 \div 3$  %.

По интервалу автокорреляции  $\tau_c$  флуктуаций фазы можно оценить скорость движения дифракционной картины по поверхности Земли

$$v_d = l_{\max} / \tau_c.$$

При  $\tau_c \approx 8$  мин,  $l_{\max} \approx 100$  км имеем  $v_d \approx 200$  м/с. Истинная скорость движения неоднородностей  $v = v_d / 2$  [42]. Значение  $v \approx 100$  м/с соответствует горизонтальной скорости разрушающихся внутренних гравитационных волн (ВГВ) на высотах нижней ионосферы. Кроме того, это значение близко к верхнему пределу скорости нейтрального ветра на этих высотах.

Таким образом, оцененные параметры случайных неоднородностей  $N$  близки к параметрам, известным из литературы.

*Вариации фазы в возмущенных условиях.*

Квазипериодические вариации фазы могут быть вызваны двумя механизмами: 1) распространением волн плотности (концентрации электронов) от места расположения мощного стенда до места прохождения трассы радиоволны; 2) генерацией колебаний на трассе, стимулированной воздействием на геокосмос мощного радиоизлучения. Рассмотрим эти механизмы подробнее.

*Генерация волн плотности.* Мощное радиоизлучение в пределах ДНА приводит к нагреву электронов и изменению их концентрации. Расчеты показали, что при  $P_1 G_1 = 300$  МВт,  $f = 5.828$  МГц и обыкновенной поляризации волны температура электронов  $T_e$  увеличилась примерно в 10 раз у основания ионосферы ( $z \approx 60 \div 70$  км), в 2–3 раза на границе D- и E-области, на 1–10 % в F-области ионосферы. Вблизи высоты верхнего гибридного резонанса (ВГР), которая лежит на несколько километров ниже высоты отражения мощной радиоволны (толщина “резонансного” слоя око-

ло 5 км)  $T_e$  увеличивалась примерно на 100 %. За счет электронной теплопроводности нагретая область расширялась вдоль магнитных силовых линий примерно на 100 км. Высота ВГР примерно равнялась 260 ÷ 270 км.

Изменение  $T_e$  привело к возмущению  $N$ . Так, на высотах  $z \approx 60 \div 70$  км в результате активизации процесса прилипания электронов  $N$  уменьшалась в 2–3 раза. В верхней части D-области, в E-области и нижней части F-области нагрев электронов привел к замедлению процесса рекомбинации и росту  $N$ . Здесь относительные изменения  $N$  по мере роста высоты уменьшались от ~100 до 10 %. В средней части F-области  $N \approx N_0$ . В окрестности высоты ВГР возмущения  $N$  составляли 10 ÷ 15 %.

Поскольку мощное радиоизлучение включалось циклически (5 мин – включено, 5 мин – пауза), в пределах ДНА и вблизи нее в верхней части F-области ионосферы возникали периодические вариации  $T_e$  и  $N$ . Могут ли при этом появляться волновые процессы с тем же (или иным) периодом? Такие процессы достоверно не известны. Возмущения  $T_e$  релаксируют за время  $t_T$ , которое в середине D-, E- и F-области соответственно порядка  $10^{-4}$ ,  $10^{-2}$  и 10 с. Времена  $t_N$  релаксации  $N$  существенно больше: единицы, единицы и даже десятки минут соответственно в верхней части D-области, E-области и в нижней части F-области. Так, при  $t_N = 3 \div 20$  мин и запаздывании  $\Delta t_1 \approx 15$  мин возмущение  $N$  уменьшается соответственно в 150 ÷ 2 раза. Если же  $\Delta t = \Delta t_2 \approx 40$  мин, то уменьшение составит  $6 \cdot 10^5 \div 1.6$  раза.

Большим свойством “устойчивости” обладают, как известно, нелинейные волны. Благодаря этому свойству нелинейные волны (солитоноподобные, кноидальные, ударные и другие) могут распространяться на значительные расстояния без существенной диссипации (см., например, [43–45]). Для проявления нелинейных свойств амплитуда волны в месте генерации должна быть достаточно большой (например,  $\delta_N > 10$  %).

Слабозатухающие перемещающиеся ионосферные возмущения вызываются квазипериодическим движением нейтральной ком-

поненты в виде акустико-гравитационных волн (АГВ). АГВ распространяются на многие тысячи километров и существуют в течение нескольких часов.

Для генерации АГВ необходимо нагреть нейтральную компоненту. В работах [46, 47] показано, что при циклическом излучении мощного радиоизлучения в атмосфере генерируются АГВ. Их относительная амплитуда, однако, невелика, не превышает 1 ÷ 10 %. Значение  $\delta_N$  при этом того же порядка. Тем не менее в F-области ионосферы эти волны нам удалось обнаружить еще в 1980-х гг. [28–33].

Существенно, что АГВ генерируются мощным радиоизлучением в верхней части F-области (высоты 300 ÷ 400 км), а по мере движения вниз их амплитуда убывает по экспоненциальному закону с масштабом  $2H \approx 15 \div 100$  км при переходе от нижней к верхней ионосфере ( $H$  – приведенная высота атмосферы).

В работе [48] описан иной механизм генерации ВГВ. Он связан с модуляцией токовой струи в динамо-области ионосферы. Расчеты показали, что в окрестности высоты отражения радиоволны километрового диапазона (около 80 км) на расстоянии ~1000 км от нагревного стенда  $\delta_N \approx (1 \div 3) \cdot 10^{-2}$  %. Это значение существенно меньше наблюдаемого (около 10 %).

Таким образом, генерация АГВ (ВГВ) в месте расположения мощного стенда и их распространение к трассе радиоволны не могут объяснить наблюдаемый эффект.

*Генерация колебаний на трассе радиоволны.* Периодическая модуляция ионосферных токов также приводит к генерации электромагнитных волн. Последние, распространяясь вдоль магнитных силовых линий, достигают магнитосферы и взаимодействуют с заряженными частицами радиационного пояса. При определенных условиях может наблюдаться стимулированное мощным радиоизлучением высыпание электронов в ионосферу [22–26]. При энергии электронов ~50 ÷ 100 кэВ на высотах  $z \approx z_r \approx 80$  км должно наблюдаться увеличение концентрации электронов. Включение и выключение мощного радиоизлучения с периодичностью в 5 мин должно приводить к “вспышкам” ионизации каждые 5 мин. Дли-

тельность такой “вспышки” определяется суммой времени действия источника и времени релаксации электронов. Последнее равно  $t_N = (2\alpha N)^{-1}$ , где  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации электронов с молекулярными ионами.

На высоте  $z \approx 80$  км в дневное время скорость рекомбинации электронов определяется в основном скоростью их рекомбинации с ионами-связками (см., например, [49]). При этом  $\alpha \approx 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ . Тогда при  $N \approx 10^9 \text{ м}^{-3}$  имеем  $t_N \approx 50$  с.

Оценим характеристики потока высыпавшихся частиц, обеспечивающих  $\delta_N \approx 10\%$  или  $\Delta N \approx 0.1N \approx 10^8 \text{ м}^{-3}$ .

Изменение скорости ионизации дается соотношением:

$$\Delta q \approx \alpha(N^2 - N_0^2),$$

где  $N$  и  $N_0$  – возмущенное и невозмущенное значения концентрации электронов. При  $\delta_N \ll 1$

$$\Delta q \approx 2\alpha N_0^2 \delta_N. \quad (8)$$

Плотность потока энергии, затрачиваемой на ионизацию нейтралов моноэнергичными частицами,

$$\Pi = 2\varepsilon_i \Delta z_i \Delta q. \quad (9)$$

Здесь  $\Delta z_i$  – толщина слоя, где поглощается поток высыпавшихся частиц;  $\varepsilon_i \approx 35$  эВ – энергия ионизации одной молекулы высыпавшимися частицами.

Подставляя (8) в (9), получим:

$$\Pi = 4\varepsilon_i \Delta z_i \alpha N_0^2 \delta_N. \quad (10)$$

Плотность потока высокоэнергичных частиц с энергией  $\varepsilon$

$$\Pi_p = \Pi / \varepsilon. \quad (11)$$

Тогда из (10) и (11) следует, что

$$\Pi_p = 4\Delta z_i \alpha N_0^2 \delta_N \varepsilon_i / \varepsilon.$$

При  $\Delta z_i = 5$  км,  $\alpha = 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $N_0 = 10^9 \text{ м}^{-3}$ ,  $\delta_N = 0.1$ ,  $\varepsilon_i = 35$  эВ,  $\varepsilon = 100$  кэВ получаем  $\Pi_p \approx 7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Если же за счет влияния молекулярных ионов  $\alpha$  уменьшается до значения  $3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , то  $t_N \approx 300$  с = 5 мин,  $\Pi_p \approx 2 \cdot 10^5 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Такие значения потока частиц в средних широтах представляются вполне реальными. При других механизмах возмущения системы ЗАИМ значения  $\Pi_p$  достигали  $10^8 \div 10^9 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [22-26].

Высыпание частиц может быть вызвано механизмом, описанным в работах [34, 35, 49]. Электрическое поле поляризации  $E_p$  с горизонтальным масштабом  $L_\perp$ , возникшее в пределах ДНА, передается в магнитосферу, вызывая уменьшение “поперечной” энергии электронов на величину

$$\Delta \varepsilon_\perp = eE_p L_\perp,$$

где  $e$  – заряд электрона.

Полагая в магнитосфере  $E_p = 3$  мВ/м,  $L_\perp = 1000$  км, получим  $\Delta \varepsilon_\perp \approx 3$  кэВ. Таких значений  $\Delta \varepsilon_\perp$  достаточно для перераспределения электронов по энергиям в магнитной ловушке и их высыпания из радиационного пояса.

Таким образом, стимулированное мощным радиоизлучением взаимодействие между подсистемами ионосфера – магнитосфера – атмосфера – ионосфера может объяснить возникновение квазипериодических возмущений фазы километровых радиоволн. Это объяснение находится в полном соответствии с результатами, описанными в обзорах [34, 35].

Добавим также, что период наблюдаемых колебаний был близок к периоду, соответствующему одной из собственных частот атмосферы – частоте Брента–Вяйсяля  $\omega_B$  (см., например, [50, 51]). Естественно предположить, что на собственной частоте, точнее вблизи этой частоты, нейтральная атмосфера как подсистема может возбуждаться при доста-

точно слабом внешнем воздействии. Колебания с частотой  $\omega_B$  “навязываются” ионизированной компоненте (ионосфере), что и вызывает периодические вариации фазы радиоволны.

В неизотермической атмосфере для  $\omega_B$  справедливо следующее соотношение:

$$\omega_B = \sqrt{\frac{g}{H} \left( \frac{\gamma-1}{\gamma} - \frac{H}{H_T} \right)}, \quad (12)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\gamma$  – показатель адиабаты,  $H_T = -T_a dz/dT_a$ ,  $T_a$  – температура атмосферы. В случае изотермической атмосферы ( $dT_a/dz = 0$ ) масштаб  $H_T \rightarrow \infty$  и формула (12) для  $\omega_B$  принимает свой привычный вид:

$$\omega_B = \sqrt{\frac{g}{H} \frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

Результаты расчета  $\omega_B$  и периода  $T_B = 2\pi/\omega_B$  приведены в табл. 2. Видно, что вблизи  $z \approx z_r \approx 80$  км  $T_B \approx 5$  мин.

Таким образом, роль нейтральной атмосферы может быть существенной. Конкретный механизм ее “возбуждения” предстоит еще выяснить. Скорее всего, он – нелинейный. Об этом свидетельствуют частотные составляющие в спектре вариаций фазы, соответствующие периодам 10 и 20 мин. Эти периоды кратны основному периоду  $T = 5$  мин.

## 7. Выводы

1. Обнаружены квазипериодические вариации фазы километровых радиоволн, сопровождавшие воздействие на ионосферу радиоизлучения удаленного на расстояние около 1000 км мощного станда “Сура”. Особенностью эксперимента было то, что квазипериодические возмущения возникали далеко за пределами ДНА станда.

2. Амплитуда фазовых вариаций достигала  $5 \div 6^\circ$ . Период этих вариаций равнялся длительности воздействия (5 мин) и продолжительности пауз (5 мин). Из этого факта следует, что система ЗАИМ одинаково реагировала на включение и выключение мощного радиоизлучения.

3. По амплитуде фазовых вариаций оценена относительная амплитуда возмущений концентрации электронов. Она достигала 10 %.

В фоновые дни среднеквадратичное отклонение фазовых флуктуаций не превышало  $0.5^\circ$ , относительные флуктуации концентрации электронов составляли  $1 \div 3$  %. Их интервал корреляции изменялся от единиц минут до десяти минут.

4. Наблюдаемый эффект не удается объяснить генерацией АГВ периодическим нагревом ионосферной плазмы.

Скорее всего, эффект связан с взаимодействием подсистем в системе ЗАИМ. Определенную роль могут также играть колебания плотности газа с периодом, близким к собственному периоду атмосферы  $T_B$ .

Автор благодарен В. П. Бурмаке и С. В. Панащенко за помощь, оказанную при работе над рукописью.

Таблица 2. Модельные значения параметров атмосферы

$z$ , км	65	70	75	80	85	90	95
$T_a$ , К	235	200	190	180	185	190	200
$H_T$ , км	34	44	95	$\infty$	-185	-133	-100
$H$ , км	6.8	5.8	5.5	5.2	5.4	5.5	5.8
$\omega_B$ , с <sup>-1</sup>	$1.12 \cdot 10^{-2}$	$1.64 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2.34 \cdot 10^{-2}$	$2.41 \cdot 10^{-2}$	$2.43 \cdot 10^{-2}$	$2.42 \cdot 10^{-2}$
$T_B$ , мин	9.33	6.36	5.16	4.48	4.35	4.31	4.31

## Литература

1. Гинзбург В. Л., Гуревич А. В. Нелинейные эффекты в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле // УФН. – 1960. – Т. 70, №2. – С. 201-246.
2. Гинзбург В. Л., Гуревич А. В. Нелинейные эффекты в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле // УФН. – 1960. – Т. 70, №3. – С. 393-417.
3. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. Издание первое. – М.: Наука, 1960. – 552 с.  
Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. Издание второе. – М.: Наука, 1967. – 684 с.
4. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М.: Наука, 1973. – 272 с.
5. Gurevich A. V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. – New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1978. – 465 p.
6. J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75, No. 31 (тематический выпуск).
7. Ютло У., Коэн Р. Изменение ионосферы под действием мощных радиоволн. – УФН. – 1973. – Т. 109, №2. – С. 371-373.
8. Radio Sci. – 1974. – Vol. 9, No. 11 (тематический выпуск).
9. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. – М.: Наука, 1984. – 392 с.
10. Молчанов О. А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. – М.: Наука, 1985. – 224 с.
11. Борисов Н. Д., Гуревич А. В., Милих Г. М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. – М.: ИЗМИРАН, 1986. – 184 с.
12. Митяков Н. А., Грач С. М., Митяков С. Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами // Итоги науки и техники. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. – 1989. – Т. 9. – С. 1-140.
13. Виленский И. М., Израйлева Н. И., Капельзон А. А., Плоткин В. В., Фрейман М. Е. Искусственные квазипериодические неоднородности в нижней ионосфере // Труды ИГГ. – Новосибирск: Наука, 1987. – 188 с.
14. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Толмачева А. В., Бахметьева Н. В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. – 156 с.
15. Гуревич А. В., Шлюгер И. С. Исследование нелинейных явлений при распространении мощного радиоимпульса в нижних слоях ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18, №9. – С. 1237-1260.
16. Gurevich A. V. Modern problems of ionospheric modification // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, №7. – С. 599-606.
17. Гуревич А. В., Зыбин К. П., Карлсон Х. С. Эффект магнитного зенита // Изв. вузов. Радиофизика. – 2005. – Т. 48, №9. – С. 772-787.
18. Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н., Котик Д. С., Токарев Ю. В. Стенд “Сура”: исследования атмосферы и космического пространства (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, №7. – С. 545-576.
19. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. – 2007. – Т. 177, №11. – С. 1145-1177.
20. Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18, №9 (тематический выпуск).
21. Изв. вузов. Радиофизика. – 1977. – Т. 20, №12 (тематический выпуск).
22. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, №1. – С. 59-106.
23. Черногор Л. Ф. Геокосмосфера – открытая динамическая нелинейная система // Вісник Харківського університету. Радіофізика та електроніка. – 2002. – №570, Вип. 2. – С. 175-180.
24. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9, №5/6. – С. 96-105.
25. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, №12. – С. 655-697.
26. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, №4. – С. 198-231.
27. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. Возникновение крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением // Компьютерная оптика. – 1989. – Вып. 6. – С. 62-71.
28. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Изучение методом вертикального зондирования реакции ионосферы на воздействие мощного радиоизлучения // Вестник Харьковского университета. Сер. Радиофизика и электроника. – 1988. – №318. – С. 29-30.
29. Черногор Л. Ф. Статистические характеристики крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых воздействием мощного нестационарного излучения // Геомагнетизм и аэрономия. – 1989. – Т. 29, №3. – С. 513-515.
30. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Исследование глобальных и крупномасштабных возмущений в ионосфере с помощью сети ионозондов // Космическая наука и техника. – 1989. – Вып. 4. – С. 72-75.
31. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Губарев А. А., Леус С. Г., Петров М. С., Похилько С. Н., Черногор Л. Ф., Юрин К. И. Влияние искусственных возмущений в нижней ионосфере, инициируемых

- мощным нестационарным радиоизлучением, на характеристики радиосигналов // Труды НИИР. – М.: Радио и связь. – 1989. – №9. – С. 57-60.
32. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Кажущиеся скорости распространения возмущения в околоземном космосе // Космическая наука и техника. – 1990. – Вып. 5. – С. 71-74.
33. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование крупномасштабных волновых возмущений в ионосфере, генерируемых мощным радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрономия. – 1990. – Т. 30, №1. – С. 159-161.
34. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – №6. – С. 17-40.
35. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Электромагнитные и геофизические эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // Электромагнитные явления. – 1998. – Т.1, №1. – С. 90-110.
36. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т. 36, №2. – С. 75-81.
37. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 10, №10. – С. 39-49.
38. Бурмака В. П., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 11. – С. 3-24.
39. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, №5. – С. 681-702.
40. Davies K. Ionospheric radio. – London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. – 580 p.
41. Безродный В. Г., Блюх П. В., Шубова Р. С., Ямпольский Ю. М. Флуктуации сверхдлинных радиоволн в волноводе Земля – ионосфера. – М.: Наука, 1984. – 144 с.
42. Казимировский Э. С. Какоуров В. Д. Движения в ионосфере. – Новосибирск: Наука, 1979. – 344 с.
43. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн: Учебное пособие. – М.: Наука, 1984. – 432 с.
44. Заславский Г. М., Сагдеев Р. З. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. – М.: Наука, 1988. – 386 с.
45. Островский Л. А., Потапов А. И. Введение в теорию модулированных волн. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 400 с.
46. Григорьев Г. И. О перемещающихся ионосферных возмущениях, возникающих при работе мощных передатчиков // Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т.18, №12. – С. 1801-1805.
47. Караштин А. Н., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. О возбуждении звука в ионосфере мощными радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. – 1977. – Т. 20, №5. – С. 787-788.
48. Григорьев Г. И., Трахтенгерц В. Ю. Излучение внутренних гравитационных волн при работе мощных нагревных стенов в режиме временной модуляции ионосферных токов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1999. – Т. 39, №6. – С. 90-94.
49. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, №4. – С. 371-375.
50. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
51. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (Обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, №1. – С. 3-25.

**Фазові варіації кілометрових  
радіохвиль, що супроводжували вплив  
на іоносферу потужного  
радіовипромінювання**

**Л. Ф. Черногор**

Виявлено квазіперіодичні варіації фази кілометрових радіохвиль, що супроводжували вплив на іоносферу радіовипромінювання віддаленого на відстань близько 1000 км потужного стенода “Сура”. Особливістю експерименту було те, що квазіперіодичні збурювання виникали далеко за межами діаграми спрямованості антени стеноду. Амплітуда фазових варіацій досягала  $5 \div 6^\circ$ . Період цих варіацій дорівнював тривалості впливу (5 хв) і тривалості пауз (5 хв). За амплітудою фазових варіацій оцінено відносну амплітуду збурювань концентрації електронів. Вона досягала 10 %. У фонові дні середньоквадратичне відхилення фазових флуктуацій не перевищувало  $0.5^\circ$ , відносні флуктуації концентрації електронів склали  $1 \div 3\%$ . Спостережуваний ефект не вдається пояснити генерацією акустико-гравітаційних хвиль періодичним нагріванням іоносферної плазми. Найімовірніше, ефект пов’язується із взаємодією підсистем у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

**Phase Variations of Kilometric  
Radio Waves Associated  
with Modification of the Ionosphere  
by High Power Radio Waves**

**L. F. Chernogor**

Quasi-periodic variations in the phase of kilometric radio waves have been detected to occur at the distance of 1000 km from the “Sura” facility emitting high power, high-frequency radio waves. The main feature of the experiment was the appearance of quasi-periodic variations far away from the facility antenna pattern. The amplitudes of phase variations reached  $5 \div 6^\circ$ , and the variation period was equal to both the duration of stimulation (5 min) and the duration of the inter-pulse period (5 min). The amplitude of the phase variations was used to estimate the relative amplitude of the electron density disturbance, which reached 10 %. On reference days, the r. m. s. value of the phase variations never exceeded  $0.5^\circ$ , and the relative fluctuations in electron density were equal to  $1 \div 3$  %. The observed effect cannot be explained by the acoustic-gravity waves generated by the periodic heating of the ionosphere. It most likely involves coupling in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system.