

УДК 537.876.23:551.
510.535
PACS numbers: 94.20.de,
94.20.Tt, 94.20.ws

В. Г. БЕЗРОДНЫЙ, О. В. ЧАРКИНА, Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ
Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, Харьков, 61002, Украина
E-mail: charkina@rian.kharkov.ua

О ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ПОГЛОЩЕНИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ ВЧ МОДИФИКАЦИИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Теоретически и экспериментально исследованы возможности модификации слабо ионизированной плазмы в рамках разных моделей поведения электронной концентрации. Проанализирована зависимость дополнительного поглощения излучения дискретных космических источников Кассиопея А и Лебедь А в D-слое искусственно возмущенной ионосферы от амплитуды нагревного сигнала во время специальных измерительных кампаний в феврале и октябре 2008 г. Модификация ионосферы осуществлялась с помощью самого мощного в мире ВЧ передатчика HAARP (Аляска, США). В качестве регистрирующего устройства использован 64-лучевой ридометрический комплекс Гакона, расположенный в непосредственной близости от нагревного стенда.

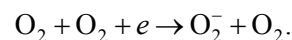
Ключевые слова: ридометр, поглощение, дискретный космический источник, радиопросвечивание ионосферы

1. Введение

Ранее в работе [1] нами были рассмотрены эффекты диссипативного поглощения излучения дискретных космических источников (ДКИ) в D-слое полярной ионосферы, модифицированной мощным ВЧ нагревом. Экспериментальная часть указанных исследований проведена на частоте 38 МГц с использованием 64-лучевого панорамного ридометра, расположенного в непосредственной близости от крупнейшего в мире нагревного стенда HAARP (пос. Гакона, Аляска, США). Детально проанализированы результаты двух специальных измерительных кампаний, проведенных в феврале и октябре 2008 г., в ходе которых искусственно возмущенная ионосферная область просвечивалась излучением двух наиболее мощных ДКИ северного неба – Кассиопеи А и Лебедя А. Оценены дополнительное поглощение излучения ДКИ и возрастание электронной температуры в D-слое ионосферы, стимулированные работой мощного нагревного стенда.

Интерпретация результатов эксперимента выполнялась с использованием теоретической модели, основанной на предположении о том, что диссипативный нагрев плазмы нижней ионосферы приводит только к возрастанию ее температуры, но не изменяет электронную концентрацию. Как следует, однако, из материалов обзора [2] и предшествующих ему работ Гуревича [3, 4], такая модель не является единственно возможной.

Более того, она реализуется исключительно в случаях воздействия на ионосферу модифицирующим излучением в достаточно широкой пространственной области, либо на сравнительно коротких временных интервалах. Невыполнение указанных условий приводит к изменению электронной концентрации, связанному с амбиполярной диффузией плазмы из области нагрева вследствие ее теплового расширения либо с нарушением ионизационно-рекомбинационного баланса в нагревной области. Последнее явление характерно только для слабо ионизированной плазмы нижней ионосферы. Его физическая природа состоит в высокой концентрации нейтральных частиц на таких ионосферных высотах, в результате чего ускоренные ВЧ нагревом электроны прилипают к нейтральным молекулам, образуя отрицательные ионы [5] в результате тройной реакции



Скорость рекомбинации образованных отрицательных ионов с положительными ионами значительно уступает электрон-ионной. Следствием такого замедления процесса рекомбинации является соответствующий рост плазменной концентрации.

Задачей настоящей статьи является теоретическое и экспериментальное исследование возможности модификации плазмы нижней ионосферы в рамках трех перечисленных моделей поведения электронной концентрации и оценка сравнительной эффективности каждой из них.

2. Теоретический анализ эффектов ВЧ модификации нижней ионосферы

В качестве исходной формулы для расчета дополнительного ионосферного поглощения $\Delta A_S = A_S^{ON} - A_S^{OFF}$ излучения ДКИ выберем соотношение, которое использовалось нами в работе [1]:

$$\Delta A_S(\alpha_S(t), \varphi_S(t)) \equiv \ln \frac{\langle I_S(\alpha_S(t), \varphi_S(t)) \rangle^{OFF}}{\langle I_S(\alpha_S(t), \varphi_S(t)) \rangle^{ON}} \approx \frac{4\pi e^2 (\bar{N}_e^{ON} \bar{v}_e^{ON} - \bar{N}_e^{OFF} \bar{v}_e^{OFF}) \Delta z}{mc\omega^2 \cos \alpha_S}. \quad (1)$$

Здесь $\langle I_S \rangle$ – средняя интенсивность излучения ДКИ; ω – его циклическая частота; $\alpha_S(t)$, $\varphi_S(t)$ – зенитный угол и азимут, текущие значения которых задаются законом движения ДКИ по небесной сфере; m , e – масса и заряд электрона; \bar{N}_e , \bar{v}_e – средняя концентрация и частота соударений электронов с молекулами; c – скорость света; Δz – характерная толщина поглощающего слоя в зенит. Верхние индексы “ON” и “OFF” соответствуют включенному и выключенному состояниям нагревного стенда.

Преобразуем (1) к более удобному для дальнейшего анализа виду:

$$\Delta A_S(\alpha_S, \varphi_S) = A_S^{OFF}(\alpha_S, \varphi_S) \left(\frac{\bar{N}_e^{ON} \bar{v}_e^{ON}}{\bar{N}_e^{OFF} \bar{v}_e^{OFF}} - 1 \right). \quad (2)$$

Здесь

$$A_S^{OFF}(\alpha_S, \varphi_S) \equiv \frac{4\pi e^2 \bar{N}_e^{OFF} \bar{v}_e^{OFF} \Delta z}{mc\omega^2 \cos \alpha_S} - \quad (3)$$

ионосферное поглощение в отсутствие нагрева. Входящие в (2), (3) частоты соударений электронов с нейтралами в нижней ионосфере \bar{v}_e^{ON} , \bar{v}_e^{OFF} , в предположении о независимости размера поперечников соударений от скорости электронов (упругие столкновения), связаны между собой известным соотношением [6, 7]

$$\bar{v}_e^{ON} / \bar{v}_e^{OFF} = (T_e^{ON} / T_e^{OFF})^{1/2}. \quad (4)$$

Что касается возрастания температуры при нагреве, то в указанной модели электронных столкновений оно описывается соотношением (см. [6], формула (38.22); [7], формула (3.34))

$$\frac{T_e^{ON}}{T_e^{OFF}} = 1 + \frac{\omega_{Heat}^2 + (v_e^{OFF})^2}{2(v_e^{OFF})^2} \times \left[\sqrt{1 + \frac{4(v_e^{OFF})^2}{\omega_{Heat}^2 + (v_e^{OFF})^2} \left(\frac{E_{Heat}}{E_p^{OFF}} \right)^2} - 1 \right]. \quad (5)$$

Здесь E_{Heat} , ω_{Heat} – амплитуда и циклическая частота нагревного излучения, $E_p^{OFF} = \sqrt{3kTm\delta [\omega_{Heat}^2 + (v_e^{OFF})^2]} / e$ – амплитуда плазменного поля на частоте ω_{Heat} в отсутствие нагрева, k – постоянная Больцмана, $\delta = 2m/M$ – доля энергии, передаваемая электроном молекуле при упругом столкновении, m – масса электрона, M – масса молекулы.

Формула (5) позволяет оценить ожидаемое возрастание температуры плазмы нижней ионосферы в конкретных условиях эксперимента. Входящее в нее значение поля E_{Heat} рассчитывается при этом на основании соотношения [6]

$$E_{Heat}(z) = 300 \sqrt{P_{eff}} / z. \quad (6)$$

Здесь $P_{eff} = (4\pi/\Delta^2)P$ – эффективная излучаемая мощность; Δ – характерная ширина главного лепестка диаграммы направленности передающей антенны; P – мощность передатчика, кВт; z – высота, км.

С использованием данных таблицы 39.1 из монографии [6], значения плазменного поля на высоте D-слоя $z = 60$ км ($v_e^{OFF} \sim 10^7$ с⁻¹) при частотах нагрева $f_{Heat} = 3.3 \div 3.4$ МГц, использованных нами в экспериментах 21 февраля и 30 октября 2008 г., могут быть оценены как $E_p(60 \text{ км}) \approx 740$ мВ/м.

Расчет эффективной амплитуды нагревного поля на тех же высотах по формуле (6), исходя из суммарной мощности передатчиков HAARP $P = 3.6$ МВт и характерной ширины лепестка его диаграммы направленности $\Delta \approx 15^\circ$ на выбранных частотах, дает значение $E_{Heat}(60 \text{ км}) \approx 4200$ мВ/м, что приводит к следующей оценке ожидаемого соотношения мощностей нагревного и плазменного полей:

$$Q(60 \text{ км}) \equiv \left(\frac{E_{Heat}}{E_p} \right)_{z=60 \text{ км}}^2 \approx 32.$$

Подстановка таких значений Q и v_e^{OFF} в формулу (5) позволяет прогнозировать ожидаемое значение соотношения температур T_e^{ON}/T_e^{OFF} на высоте D-слоя $z = 60$ км:

$$\left(T_e^{ON}/T_e^{OFF}\right)_{z=60 \text{ км}} \approx 10.$$

Перейдем теперь к оценке дополнительного поглощения ΔA_S излучения ДКИ в модифицированной нижней ионосфере в рамках трех перечисленных выше моделей поведения средней концентрации плазмы.

2.1. Сохранение неизменного значения электронной плотности, $\bar{N}_e^{ON} = \bar{N}_e^{OFF}$

Учет такого условия в выражении (2), а также соотношений (4), (5) приводит к формуле

$$\Delta A_S(\alpha_S, \varphi_S) = A_S^{OFF}(\alpha_S, \varphi_S) \left\{ \left[1 + \frac{\omega_{Heat}^2 + (v_e^{OFF})^2}{2(v_e^{OFF})^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\sqrt{1 + \frac{4(v_e^{OFF})^2}{\omega_{Heat}^2 + (v_e^{OFF})^2} Q(z)G(\alpha_S, \varphi_S) - 1} \right) \right]^p - 1 \right\}. \quad (7)$$

Здесь $G(\alpha_S, \varphi_S)$ – нормированная к единице диаграмма направленности нагревного стэнда, задающая изменение мощности нагрева E_{Heat}^2 в направлении $\{\alpha_S(t), \varphi_S(t)\}$ на источник при его движении по небесной сфере; показатель степени $p = 1/2$.

2.2. Амбиполярная диффузия плазмы из области нагрева

Согласно выводам работ [3, 4] в этом случае концентрация и температура электронов связаны между собой соотношением

$$\frac{\bar{N}_e^{ON}}{\bar{N}_e^{OFF}} = \frac{2}{T_e^{ON}/T_e^{OFF} + 1}. \quad (8)$$

Подстановка (8) в (1) и последующие несложные преобразования приводят к формуле

$$\Delta A_S = - \frac{\left(\sqrt{T_e^{ON}/T_e^{OFF}} - 1\right)^2}{T_e^{ON}/T_e^{OFF} + 1} < 0,$$

свидетельствующей о том, что в указанных условиях нагрева ионосферной плазмы поглощение из-

лучения космического источника в ней не увеличивается, а, наоборот, убывает. Физической причиной такой неожиданной реакции поглощения является преобладание скорости падения концентрации электронов в результате их тепловой диффузии из области нагрева над скоростью роста частоты столкновений электронов с нейтральными молекулами.

2.3. Нарушение ионизационно-рекомбинационного баланса.

Как показано в работе [3], вследствие замедления процессов рекомбинации концентрация электронов в этом случае увеличивается с ростом температуры по закону

$$N_e^{ON}/N_e^{OFF} = \left(T_e^{ON}/T_e^{OFF}\right)^{3/4}. \quad (9)$$

Подстановка в выражение (2) соотношений (4), (5), (9) приводит к уже известной формуле (7) с заменой в ней значения показателя степени на $p = 5/4$.

Таким образом, проведенный в настоящем подразделе теоретический анализ зависимости дополнительного поглощения диагностического излучения ДКИ в нижней ионосфере от амплитуды модифицирующего электромагнитного поля показал, что из трех возможных моделей поведения электронной концентрации ионосферной плазмы под действием ВЧ нагрева только двум соответствует возрастание значения поглощения ΔA_S : модели $N_e = \text{const}$ и модели $N_e \sim T_e^{3/4}$ (нарушение ионизационно-рекомбинационного баланса). В обоих случаях дополнительное поглощение описывается одной и той же формулой (7), но с разными значениями показателя степени:

$$p = 1/2 \text{ – сохранение концентрации,} \quad (10)$$

$$p = 5/4 \text{ – нарушение баланса ионизации.}$$

Что касается модели понижения электронной концентрации в результате теплового расширения плазмы, то ее реализация должна приводить не к возрастанию, а к уменьшению поглощения диагностического излучения в ходе ВЧ нагрева, сведения о наблюдениях которого в литературе отсутствуют. Приведенные в настоящем разделе заключения указывают на потенциальные возможности использования регистраций излучения ДКИ для идентификации физических явлений, сопутствующих процессу ВЧ модификации ионосферы, что будет проиллюст-

рировано в следующем разделе на примере полученных нами ранее экспериментальных данных.

3. Интерпретация экспериментальных данных

Воспользуемся результатами теоретического анализа, проведенного в разделе 2, для интерпретации экспериментальных данных нашей работы [1], полученных в ходе измерительных кампаний 21 февраля и 30 октября 2008 г. Напомним, что в первой из них нагревный стенд HAARP излучал вертикально вверх мощную волну О-поляризации на частоте 3.3 МГц. Режим работы состоял из чередования 5-минутных включений (“ON”) и таких же пауз (“OFF”). Полная длительность циклов переключений составляла 50 мин (с 23:10 до 24:00 UT). Во второй кампании диаграмма направленности нагревного стенда HAARP была ориентирована в направлении ($\alpha = 24^\circ$, $\varphi = 130^\circ$), по-прежнему излучалась волна О-поляризации, но уже в режиме 9-минутных включений и 6-минутных пауз. Частота нагрева, исходя из ионосферных условий, была выбрана равной 3.4 МГц. Полная длительность циклов переключений составляла 60 мин (с 01:03 до 02:03 UT). В обеих кампаниях в качестве регистрирующего устройства использовался 64-лучевой панорамный риометр, расположенный в непосредственной близости от стенда HAARP. Параметры излучения HAARP в ходе обсуждаемых измерительных кампаний приведены в табл. 1, взятой из работы [1].

3.1. Сопоставление экспериментальных данных с результатами модельных теоретических расчетов

Как было установлено в разделе 2, только две теоретические модели ВЧ модификации нижней ионосферы способны приводить к возрастанию поглощения диагностического излучения в нижней ионосфере, а именно: модель с неизменным значением

электронной концентрации и модель с нарушением ионизационно-рекомбинационного баланса. Дополнительное поглощение ΔA_S в обеих моделях описывается одинаковыми по структуре формулами, отличающимися друг от друга только значениями входящего в них параметра p (см. (7), (10)). Вторым важным параметром в этих формулах является соотношение Q мощностей нагревного и плазменного полей частоты ω_{Heat} , характеризующее эффективность процесса ионосферной модификации. Отсюда совершенно очевидно, что сопоставление экспериментальных значений ΔA_S с результатами расчетов на основе указанных теоретических моделей открывает возможность качественной идентификации физических процессов в области ионосферной модификации (выбор параметра p) и их количественного описания (оценка параметра Q). Проиллюстрируем указанную возможность на примере экспериментальных данных, полученных 21.02.2008 г. и 30.10.2008 г.

На рис. 1, а, б представлены модельные временные зависимости дополнительного поглощения $\Delta A_S(t)$ излучения ДКИ Кассиопея А (тонкие линии) для измерительной кампании 21.02.2008 г. Вычисления были проведены по формуле (7) при указанных в подписи к рисунку значениях параметров p и Q с использованием расчетной диаграммы направленности $G(\alpha_S(t), \varphi_S(t))$ стенда HAARP в направлении на источник. Поглощение в отсутствие нагрева A_S^{OFF} оценивалось на основании формулы (3) с использованием значений ионосферных параметров, приведенных в работе [4]. Жирной линией изображена сглаженная экспериментальная кривая $\Delta A_S(t)$, представленная в работе [1] на рис. 5.

Сравнение экспериментальной кривой с расчетными зависимостями свидетельствует о достаточно хорошем совпадении условий эксперимента с моделью “ $p = 5/4$ ” и полном несоответствии с моделью “ $p = 1/2$ ”. Более того, в первом случае указанное сравнение позволяет оценить

Таблица 1. Параметры излучения стенда HAARP в нагревных кампаниях 2008 г.

Дата	Режим излучения	Время UT	Частота, МГц	Поляризация	Ориентация луча
21.02.2008	5 мин “ON”, 5 мин “OFF”	23:10–24:00	3.3	“O”	$\alpha = \psi = 0$
30.10.2008	9 мин “ON”, 6 мин “OFF”	01:18–02:03	3.4	“O”	$\alpha = 24^\circ; \psi = 130^\circ$

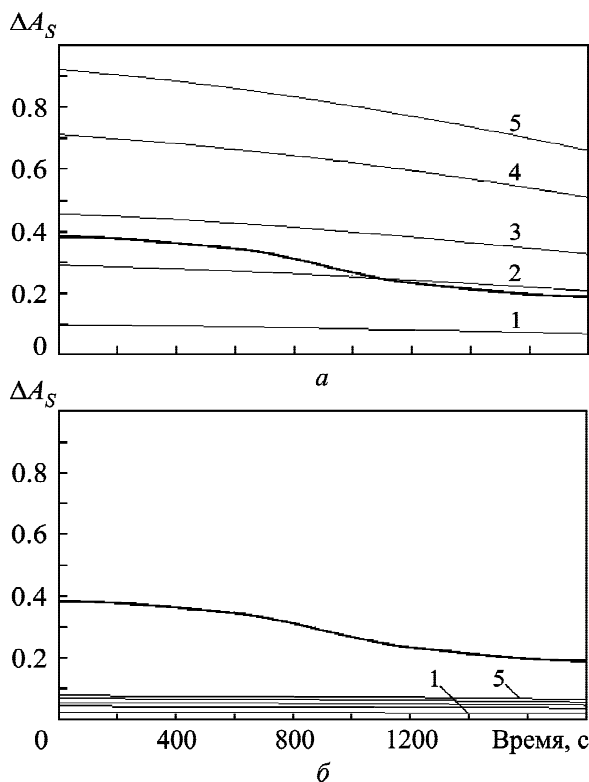


Рис. 1. Расчетные зависимости (тонкие линии) и экспериментальная кривая изменений дополнительного поглощения $\Delta A_s(t)$ по данным измерительной кампании 21.02.2008 г.: $a - p = 5/4, A_s^{OFF} = 2 \cdot 10^{-2}$; $b - p = 1/2, A_s^{OFF} = 2 \cdot 10^{-2}$; линия 1 – $Q = 10$, линия 2 – $Q = 50$, линия 3 – $Q = 100$, линия 4 – $Q = 200$, линия 5 – $Q = 300$

также соотношение мощностей нагревного и плазменного полей: $Q \approx 40 \div 80$.

На рис 2, a, b представлены экспериментальная кривая (жирная линия) и модельные зависимости (тонкие линии) дополнительного поглощения излучения ДКИ Лебедь А для измерительной кампании 30.10.2008 г. Как и в февральской кампании, модель “ $p = 1/2$ ” демонстрирует свое несоответствие условиям эксперимента. Параметр Q в модели “ $p = 5/4$ ” оценивается значениями $Q \approx 3 \div 15$.

4. Выводы

Таким образом, проведенный в разделе 2 теоретический анализ эффекта поглощения излучения ДКИ в модифицированной нижней ионосфере и последующее сопоставление результатов этого анализа с экспериментальными данными двух измерительных кампаний 2008 г. в разделе 3 продемонстрировали возможность использования такого сопоставления как для качественной идентификации физи-

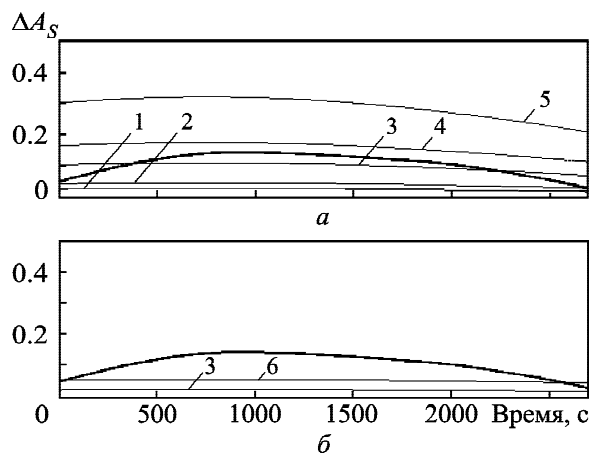


Рис. 2. Расчетные зависимости (тонкие линии) и экспериментальная кривая изменений дополнительного поглощения $\Delta A_s(t)$ по данным измерительной кампании 30.10.2008 г.: $a - p = 5/4, A_s^{OFF} = 2 \cdot 10^{-2}$; $b - p = 1/2, A_s^{OFF} = 2 \cdot 10^{-2}$; линия 1 – $Q = 1.5$, линия 2 – $Q = 3$, линия 3 – $Q = 10$, линия 4 – $Q = 20$, линия 5 – $Q = 50$, линия 6 – $Q = 100$

ческих процессов в области ионосферного нагрева по значению параметра p , так и для их количественного описания с использованием параметра Q .

Исследования выполнены в соответствии с рабочим планом бюджетной ведомственной НИР “Ятаган-2” (№ 0111U000063) при частичной финансовой поддержке в рамках НИР “Теоплазма” (№ 0115U004078).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безродный В. Г., Чаркина О. В., Ямпольский Ю. М., Воткинс Б., Гровс К. Исследование стимулированных ионосферных мерцаний и поглощения излучения дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ риометра // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. – Т. 15, № 2. – С. 151–163.
2. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 11. – С. 1145–1177.
3. Гуревич А. В. К теории нелинейных эффектов при распространении радиоволн в ионосфере // Геомагнетизм и аэрномия. – 1965. – Т. 5, № 1. – С. 70–80.
4. Гуревич А. В. Воздействие радиоволн на ионосферу в области F-слоя // Геомагнетизм и аэрномия. – 1967. – Т. 7, № 2. – С. 291–299.
5. Илленбергер Е., Смирнов Б. М. Прилипание электронов к свободным и связанным молекулам // Успехи физических наук. – 1998. – Т. 168, № 7. – С. 731–766.
6. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М: Наука, 1967. – 683 с.
7. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. – М: Наука, 1973. – 272 с.

REFERENCES

1. BEZRODNY, V. G., CHARKINA, O. V., YAMPOLSKI, Yu. M., WATKINS, B. and GROVES, K., 2010. Stimulated ionospheric scintillations and absorption of discrete cosmic sources radiation investigated with an imaging HF riometer. *Radiofizika i Radioastronomia*. vol. 15, no. 2, pp. 151–163 (in Russian).
2. GUREVICH, A. V., 2007. Nonlinear effects in the ionosphere. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. vol. 177, no. 11, pp. 1145–1177 (in Russian).
3. GUREVICH, A. V., 1965. On the theory of nonlinear effects associated with radio wave propagation in the ionosphere. *Geomagnetizm i Aeronomiya*. vol. 5, no 1, pp. 70–80 (in Russian).
4. GUREVICH, A. V., 1967. Radio wave influence on the ionosphere in the F-layer. *Geomagnetizm i Aeronomiya*. vol. 7, no. 2, pp. 291–299 (in Russian).
5. ILLENBERGER, E. and SMIRNOV, B. M., 1998. Electron attachment to atomic systems. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. vol. 168, no. 7, pp. 731–766 (in Russian).
6. GINSBURG, V. L., 1967. *Electromagnetic wave propagation in plasmas*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
7. GUREVICH, A. V. and SHVARTSBERG, A. B., 1973. *Non-linear theory of propagation of radio waves in the ionosphere*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).

V. G. Bezrodny, O. V. Charkina, and Y. M. Yampolski

Institute of Radio Astronomy, National Academy of Science of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

ON THE ADDITIONAL ABSORPTION OF RADIO EMISSION FROM DISCRETE COSMIC SOURCES UNDER HF MODIFICATION OF THE LOWER IONOSPHERE

The possibilities of modification of a weakly ionized plasma are investigated theoretically and experimentally within different electron density behavior models. The dependence of the addi-

tional absorption of radiation of discrete cosmic sources Cassiopeia A and Cygnus A in the artificially disturbed ionospheric D-region on the amplitude of heating signal during the special measuring campaigns of February and October 2008 has been analyzed. The ionosphere has been modified with using the world most powerful HAARP heater, Alaska, USA. The 64 beam riometer located in the immediate vicinity of the heater was used as the recording system.

Key words: riometer, absorption, discrete cosmic source, trans-ionospheric sounding

В. Г. Безродний, О. В. Чаркіна, Ю. М. Ямпольський

Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

ЩОДО ДОДАТКОВОГО ПОГЛИНАННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ДИСКРЕТНИХ КОСМІЧНИХ ДЖЕРЕЛ ПІД ЧАС ВЧ МОДИФІКАЦІЇ НИЖНЬОЇ ІОНОСФЕРИ

Теоретично та експериментально досліджено можливості модифікації слабо іонізованої іоносферної плазми в межах різних моделей поведінки електронної концентрації. Проаналізовано залежність додаткового поглинання випромінювання дискретних космічних джерел Кассіопея А та Лебідь А у D-шарі штучно збуреної іоносфери від амплітуди нагрівного сигналу під час спеціальних вимірювальних кампаній у лютому та жовтні 2008 р. Модифікація іоносфери здійснювалася за допомогою найпотужнішого у світі ВЧ передавача HAARP (Аляска, США). У якості ресструючого пристрою використано 64-променевий ріометричний комплекс Гакона, розташований у безпосередній близькості від нагрівного стенду.

Ключові слова: ріометр, поглинання, дискретне космічне джерело, радіопросвічування іоносфери

Статья поступила в редакцию 10.11.2015