

УДК 550.388.8

## КОРРЕЛЯЦИЯ СТАБИЛЬНЫХ КРАСНЫХ ДУГ И ЭМИССИЙ $H_{\beta}$ С ПОТОКАМИ ИОНОВ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ И ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯМИ

*Чмырев В. М., Кузьмин А. К., Лазарев В. И.,  
Исаев Н. В., Биличенко С. В., Тараненко Ю. Н.,  
Тельцов М. В., Теодосиев Д. К.*

Во время сильной геомагнитной бури 2.III 1982 г. на четырех витках спутника «Интеркосмос – Болгария-1300» наблюдались стабильные красные дуги и профили с повышенной интенсивностью эмиссии  $H_{\beta}$ , сопровождавшиеся квазиоперечными потоками ионов с  $E=0,1-5$  кэВ, ОНЧ-излучениями на частотах 5–15 кГц и квазипостоянными электрическими полями до 50 мВ/м. Исходя из экспериментальных данных высказано предположение о возможности локальной стимуляции наблюдавшихся явлений мощными электромагнитными волнами низкочастотного диапазона от наземных источников. Рассмотрены различные механизмы стимуляции.

**1. Введение.** Стабильные авроральные красные дуги (SAR-дуги) обнаружены в 1956 г. и с тех пор интенсивно изучаются как наземными, так и спутниковыми методами. Основные морфологические и физические характеристики этого явления описаны в работах [1–4]. Установлено, что поток энергии, необходимый для возбуждения и поддержания SAR-дуги, составляет 0,01–0,2 эрг/см<sup>2</sup>·с [2]. Согласно существующим представлениям такой поток энергии в ионосферу обеспечивается за счет переноса из магнитосферы сверхтепловых электронов, ускоренных в области плазмоспаузы в процессе бесстолкновительного затухания ионно-циклотронных волн, которые генерируются ионами кольцевого тока [5], либо кинетических альвеновских волн [6].

В [3] зарегистрированы потоки выпадающих сверхтепловых (5–10 эВ) электронов в области наблюдения SAR-дуг; величина потока энергии была достаточной для разогрева ионосферных электронов до температуры, необходимой для возбуждения  $O(^1D)$  SAR-дуги. Измерения проводились на высоте 850 км с ИСЗ DE-2. На ИСЗ DE-1, пролетавшем через те же магнитные силовые трубки, но на высоте ~6000 км, электроны с  $E=5-10$  эВ не наблюдались [4]. Отсюда следует, что механизм формирования потоков ускоренных частиц носит локальный характер и действует на высотах ниже 6000 км, между орбитами DE-1 и DE-2 [3, 4], что противоречит [5, 6].

Другим важным фактом, который не объясняется ни одной из существующих теорий, является то, что в периоды непрерывных наблюдений с борта ИСЗ SAR-дуги регистрировались не на всех пролетах через субавроральную зону [1, 2]. Это связывалось либо с нестационарностью дуг на временной шкале 1–2 ч, либо с сильно неоднородным долготным распределением SAR-дуг [2].

Цель настоящей работы – представить анализ результатов измерения волновых излучений, потоков частиц и квазипостоянных электрических полей в области SAR-дуг и максимумов интенсивности  $H_{\beta}$ -эмиссии в период магнитной бури 2.III 1982 г. и исследовать возможность искусственной стимуляции этих явлений наземными источниками радиоизлучения.

**2. Корреляция эмиссий  $H_{\beta}$  и 630 нм с ОНЧ-излучениями и электрическими полями.** Обсуждаемые ниже данные получены во время сильного магнитосферного возмущения 2.III 1982 г.

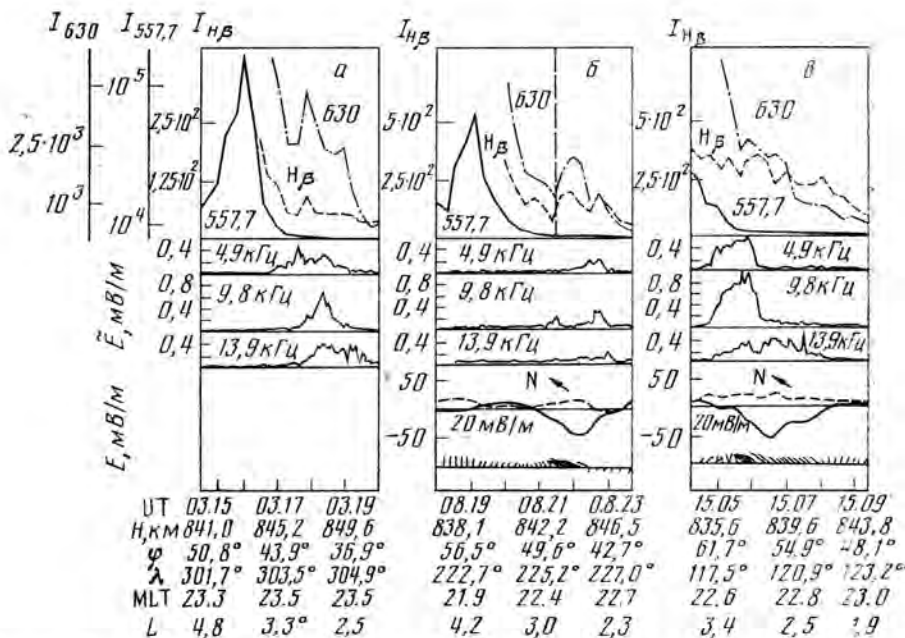


Рис. 1. Распределение интенсивности  $I$  эмиссий 557,7 нм [OI], 630 нм [OI] и  $H_{\beta}$ , а также ОНЧ-излучений  $E$  на частотах  $f_0=4,9; 9,8; 13,9$  кГц в полосе  $\Delta f=f_0/6$ , напряженности горизонтальных компонент квазипостоянного электрического поля  $E_x$  (сплошная линия) и  $E_y$  (штрихи) в орбитальных координатах и вектора  $E$  вдоль траектории ИСЗ. Граница авроральной зоны обозначена вертикальной штриховой линией на панели б. Стрелки указывают направление на северный геомагнитный полюс. Характеристики геомагнитной возмущенности: а -  $K_p=8-$ ,  $D_{st}=-220$  нТл; б -  $K_p=7-$ ,  $D_{st}=-216$  нТл; в -  $K_p=5+$ ,  $D_{st}=-173$  нТл.  $\varphi$  и  $\lambda$  - географические широта и долгота

На рис. 1 представлены данные по интенсивности эмиссий 557,7 нм [OI], 630 нм [OI],  $H_{\beta}$ , ОНЧ-излучений и квазипостоянных электрических полей на среднеширотных участках орбит 2920, 2923 и 2927 ИСЗ «Интеркосмос - Болгария-1300» (далее ИК-Б-1300).

Профиль свечения в интервале 03.15-03.17 UT (рис. 1а) получен при пересечении аврорального овала. Яркая SAR-дуга с интенсивностью в максимуме  $\sim 4$  кR наблюдалась около 03.18 UT на более низких широтах в области  $L \approx 3$ . Интенсивность  $H_{\beta}$  в этой области составляла 100R. Во всей зоне субаврорального свечения наблюдалось значительное возрастание интенсивности ОНЧ-шумов, причем низкочастотные эмиссии смещены к экватору от максимума интенсивности 630 нм (заметим, что фотометр «смотрел» в подспутниковую область вдоль местной вертикали).

На витке 2923 (рис. 1б) профиль интенсивности свечения авроры имел максимум вблизи 08.19 UT и простирался до 08.21:20 UT, когда ИСЗ пересек экваториальную границу авроральной зоны, идентифицированную по потоку высыпającychся 1-кэВ электронов. К тому же этой границы зарегистрирована SAR-дуга ( $I_{max} \approx 2$  кR) около 08.22 UT. В этой же области (немного полярнее) наблюдалось возрастание интенсивности свечения  $H_{\beta}$  до 200R. Отметим, что сопровождение монохроматических SAR-дуг (630 нм [OI]) локальными максимумами  $H_{\beta}$  наблюдалось ранее многократно с поверхности Земли, причем эти максимумы, как правило, находились полярнее максимумов  $\lambda 630$  нм. Интенсивность эмиссии  $\lambda 557,7$  нм монотонно убывала по мере удаления от зоны полярных сияний и в области SAR-дуги не превышала 2 кR. Спектрометр ионов на данном участке траектории ИСЗ работал в режиме низкой опрносности, что не позволило построить профиль интенсивности потока частиц вдоль орбиты. Однако вблизи максимума свечения ( $\sim 08.22$  UT) зафиксированы потоки ионов сpitch-углами  $\alpha \approx 70^\circ$  и энергиями 0,4-1,0 кэВ, причем интенсивность потоков превышала  $I = (0,2-3) \cdot 10^8$  см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ·ср $^{-1}$ ·кэВ $^{-1}$  - уровень насыщения прибора в режиме работы без адаптации на каналах 0,4-1 кэВ.

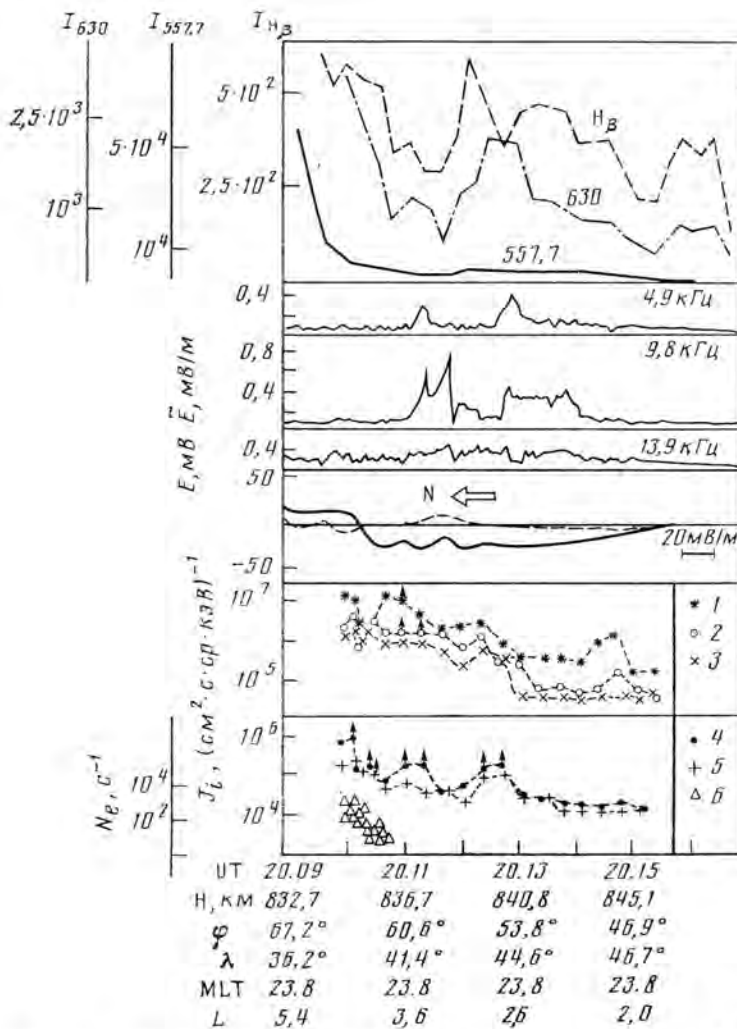


Рис. 2. Те же параметры, что на рис. 1, и распределение дифференциальных потоков ионов  $I_i$  с пичч-углами  $\alpha=70^\circ$  на витке 2930. Обозначения энергетических каналов: 0,4 кэВ (1), 0,7 кэВ (2), 1 кэВ (3), 2,7 кэВ (4), 5,1 кэВ (5); 6 – скорость счета  $N_e$  выходящих электронов с энергией 1 кэВ.

Область наблюдения интенсивных ОНЧ-излучений сдвинута к экватору от SAR-дуги и сопрягается с ней по магнитному полю, если считать, что свечение имеет максимум на высоте 400 км.

Из двух нижних панелей рис. 1б видно, что в зоне субавроральных максимумов эмиссий  $\lambda 630$  нм и  $H_\beta$  и коррелированных с ними интенсивных ОНЧ-излучений наблюдалось аномально большое для этих широт электрическое поле – до 50 мВ/м. Векторы поля слегка отклонены к западу от направления на северный геомагнитный полюс. В магнитосопряженной зоне в южном полушарии на этом же витке ( $\sim 08.52$  UT) зафиксировано поле величиной 25 мВ/м, направленное к южному геомагнитному полюсу.

Взаимосвязь субавроральных максимумов эмиссий  $H_\beta$  и 630 нм с ОНЧ-излучениями и квазипостоянными электрическими полями, проиллюстрированная рис. 1б, подтверждается результатами измерений на витке 2927, которые представлены на рис. 1в.

3. Низкоэнергичные ионы в области субавроральных максимумов эмиссий  $H_\beta$  и  $\lambda 630$  нм [OI]. Выше отмечалось усиление потоков низкоэнергичных ионов в области субаврорального свечения на витке 2923. Корреляция в появлении максимума интенсивности 630 нм [OI] и  $H_\beta$  на сред-

них широтах с потоками ускоренных ионов в диапазоне энергий 0,4–5 кэВ, а также с квазипостоянными и ОНЧ-электрическими полями отчетливо проявилась на витке 2930.

На рис. 2 вместе с профилями интенсивности свечения, ОНЧ-шумов и напряженности электрического поля показано распределение дифференциальных потоков ионов вблизи экваториальной границы авроральной зоны и в субавроральной области. Пересечение спутником границы авроральной зоны фиксировалось по выходу на фоновые значения скорости счета электронов с  $E=1$  кэВ, движущихся к Земле с пичч-углами  $\alpha \approx 20^\circ$ . По этим данным ИСЗ вышел из авроральной области в 20.10 : 40 UT. На рис. 2 приведены потоки ионов с  $\alpha \approx 70^\circ$  и  $E=0,4; 0,7; 1,0; 2,7$  и 5,1 кэВ. Потоки ионов для  $\alpha=20^\circ$  не приводятся, их величины по крайней мере на порядок меньше, чем при  $\alpha \approx 70^\circ$ , на рассматриваемом участке орбиты ИСЗ.

Как видно из рис. 2, за пределами зоны полярных сияний ИСЗ зарегистрировал два интенсивных максимума свечения  $\lambda 630$  нм (20.12–20.14 UT,  $I_{\max} \approx 2$  кR, и  $\sim 20.16$  UT,  $I_{\max} \approx 1$  кR) и максимум интенсивности  $H_\beta$  ( $I_{\max} \approx 600$  R в  $\sim 20.12 : 15$  UT и  $I_{\max} \approx 350$  R в  $\sim 20.16$  UT). Если учесть, что на данном пролете из-за наклона силовых линий геомагнитного поля ИСЗ пересекал силовую трубу, в которой наблюдалось свечение, с задержкой  $\sim 20$  с относительно момента регистрации максимума интенсивности свечения, то можно полагать, что наблюдаемые вариации интенсивности  $H_\beta$  связаны с особенностями пространственного распределения ионов. Так, уменьшение свечения в 20.09 : 52 UT согласуется с уменьшением интенсивности ионных потоков низкоэнергичной группы в 20.10 : 10–20.10 : 20 UT, а большая интенсивность  $H_\beta$  вблизи границы авроральной зоны ( $\sim 20.10 : 10$  UT) – с увеличением потока ионов в интервале 20.10 : 30–20.11 : 30 UT вплоть до зашкала аппаратуры (предельные значения потоков отмечены стрелками). Субавроральный максимум интенсивности  $H_\beta$  в 20.12 : 25 UT связан, очевидно, с усилением потока ионов 2,7–5 кэВ (также до насыщения измерительного канала) в интервале 20.12 : 30–20.12 : 50 UT. Подчеркнем еще раз важную особенность наблюдаемых ионов – резкую угловую анизотропию: потоки с  $\alpha \approx 70^\circ$  в 10–30 раз превышают потоки с  $\alpha \approx 20^\circ$  для всех энергий в диапазоне 0,1–5 кэВ.

Два максимума интенсивности ОНЧ-волн на частотах  $\sim 4,9$  кГц (рис. 2) четко привязаны к максимумам потоков ионов с  $E \sim 2,7$  кэВ. Зона наблюдения более высокочастотных излучений шире и смещена к экватору. В низкоширотной части этой зоны прямой связи с ионами не наблюдается. Можно предполагать, что полоса излучения между 13 и 14 мин на частотах 9,8 и 13,9 кГц связана с источником возбуждения SAR-дуги (повидимому, сверхтепловыми электронами), с которой эта полоса хорошо сопряжена.

Зона повышенных значений квазипостоянных электрических полей шире, чем в предыдущих сеансах, что может быть связано с особенностью данной орбиты (см. п. 4).

**4. Локализация областей свечения.** Характерным свойством SAR-дуг, наблюдавшихся на четырех витках ИР–Б-1300 2. III 1982 г., является их географическое положение. Оказалось, что каждая из них лежала в пределах 20-градусной зоны относительно мощного наземного ОНЧ-передатчика. Так, например, дуга, показанная на рис. 1б ( $\sim 08.22$  UT), наблюдалась в  $12^\circ$  по долготе от ст. NLK ( $48^\circ 12' N, 121^\circ 55' W$ ), а дуга, зарегистрированная на витке 2930 ( $\sim 20.13$  UT), – при пролете непосредственно над передатчиком УТР-3 ( $56^\circ 11' N, 43^\circ 58' E$ ). Более низкоширотная полоса свечения наблюдалась на этом же витке около 20.16 UT (см. рис. 2), когда ИСЗ проходил на минимальном расстоянии ( $\sim 8^\circ$  по долготе) от краснодарского ОНЧ-передатчика. Зону архангельского передатчика УПД-8 ( $64^\circ 24' N, 41^\circ 32' E$ ) ИСЗ пересек в интервале 20.10–20.14 UT в  $2,5^\circ$  к востоку от передатчика. Согласно рис. 2 эта зона находилась на краю и частично внутри области интенсивного аврорального излучения, которое маскировало возможные эффекты передатчика. На двух других витках (2920 и 2927) оптические эмиссии были локализованы вблизи

ОНЧ-радиостанций на Дальнем Востоке в СССР и на Атлантическом побережье США.

**5. Обсуждение.** На основании описанных выше наблюдений возникает предположение, что неоднородное по долготе распределение интенсивности эмиссий может быть связано с наземными источниками энергии, воздействие которых на ионосферно-магнитосферную плазму приводит к разогреву частиц и возбуждению свечения. Чтобы проверить это предположение, мы нанесли на карту зону наблюдения SAR-дуг с ИСЗ OVI-10 и OGO-4 [1, 2]. Оказалось, что и в этих случаях красные дуги были зарегистрированы в областях вблизи передатчиков или в магнитосопреженных районах.

ОНЧ-радиостанции, в том числе упомянутые выше, являются мощными источниками энергии, излучающими от сотен киловатт до мегаватта в диапазоне частот 10–30 кГц. Постоянная (или долговременная) закачка мощного радиоизлучения в ионосферу и магнитосферу должна приводить к модификации ионосферно-магнитосферной плазмы. В ОНЧ-диапазоне известны эффекты стимуляции электронных и ионных высыпаний из магнитосферы в ионосферу Земли [8, 11, 12]. Вариации интенсивности атмосферных эмиссий под воздействием сигналов ОНЧ-передатчиков наблюдались в [7, 8]. В литературе рассматривались различные механизмы искусственной стимуляции геофизических процессов интенсивными ОНЧ-волнами. Это — модуляция ионосферной проводимости за счет Джоулева нагрева в поле ОНЧ-волн (см. обзор [13] и ссылки в нем), резонансное взаимодействие свистовых волн с частицами в магнитосфере [9, 10], диффузии частиц на свистах вблизи резонансного конуса [13], пич-угловое рассеяние частиц на ионно-циклотронных и низкочастотных плазменных волнах, возбуждаемых при параметрической неустойчивости свистов и ионосферно-магнитосферной плазме [14], стимуляция свечения ионосферы за счет разогрева частиц нижнегибридными волнами при распадной неустойчивости свистов [15] и др.

Переходя к рассмотрению возможных механизмов искусственной локальной стимуляции эмиссий  $H_\beta$  и 630 нм [OI] в ионосфере сигналами ОНЧ-передатчиков определим, что эти механизмы должны обеспечить:

- 1) формирование потоков сверхтепловых электронов с  $E=5-10$  эВ на высотах  $\leq 6000$  км;
- 2) возникновение квазипоперечных относительно внешнего магнитного поля потоков ионов с  $E=0,1-5$  кэВ на ионосферных высотах;
- 3) генерацию ОНЧ-шумов на частотах 5–15 кГц;
- 4) генерацию квазипостоянных электрических полей в силовых трубках, проходящих через SAR-дуги.

Как отмечалось выше, при анализе источников возбуждения SAR-дуг рассматриваются обычно два основных механизма, связанных с генерацией электромагнитных ионно-циклотронных волн протонами кольцевого тока [5] и кинетических альвеновских волн в окрестности плазмопаузы [6], взаимодействующих с тепловыми электронами. Известно также, что ионно-циклотронные волны, как электростатические, так и электромагнитные, являются эффективным средством поперечного ускорения ионов в верхней ионосфере. Вместе с тем если говорить о свистовых волнах, то из-за большой фазовой скорости их взаимодействие с надтепловыми электронами с  $E=5-10$  эВ и ионами с  $E \leq 5$  кэВ в верхней ионосфере неэффективно. Поэтому представляется разумным рассмотреть двухступенчатый процесс, а именно нелинейную трансформацию свистовой волны, излучаемой наземным ОНЧ-передатчиком, в другие собственные (или вынужденные) моды плазменных волн, более эффективные с точки зрения ускорения частиц, и затем взаимодействие этих вторичных эмиссий с ионосферной и магнитосферной плазмой. Известно, что наименьшими порогами и наибольшими инкрементами в условиях верхней ионосферы обладают два нелинейных процесса с участием свистовых волн: индуцированное рассеяние свиста в низкочастотную плазменную волну на тепловых ионах и распад свиста на низкочастотную плазменную и ионно-циклотронную волны [16, 17] (низкочастотные плазменные волны, распространяющиеся

ся под относительно небольшим углом к магнитному полю,  $\cos^2 \theta \gg m/M$ , имеют частоту  $\omega \approx \omega_{ve} \cos \theta$ , а при больших углах,  $\cos^2 \theta < m/M$ , их частота близка к  $\omega = \omega_{ur}$ , где  $\omega_{ur}$  — частота нижнего гибридного резонанса,  $\omega_{ve}$  — гирочастота электронов,  $m$  и  $M$  — массы электронов и ионов соответственно). Детальное исследование процессов индуцированного рассеяния волн в плазме выполнено в [18], где указано, в частности, на возможность их применения для нагрева плазмы когерентным радиоизлучением. Согласно оценкам [16–18] амплитуды свистовых волн от современных наземных ОНЧ-передатчиков в ионосфере на высотах (1–2) тыс. км превышают пороговые значения для нелинейного рассеяния в низкочастотные плазменные и нижнегибридные волны, а инкремент рассеяния достигает  $\gamma \geq \geq 30 \text{ с}^{-1}$ . С нашей точки зрения, этот процесс должен играть важную роль как механизм, обеспечивающий нагрев ионосферных ионов и их вынос в магнитосферу в зоне воздействия сигналов низкочастотных наземных передатчиков.

Распад свиста на низкочастотную плазменную (нижнегибридную) и ионно-циклотронную волны, более эффективный на больших высотах, также приводит к раскачке с довольно большим инкрементом ( $\gamma \geq 5 \text{ с}^{-1}$  [17]) электростатических волн, которые могут вызвать нагрев ионов поперек внешнего магнитного поля и электронов вдоль поля.

Третий процесс, который необходимо учитывать при анализе эффектов воздействия ОНЧ-волн на ионосферно-магнитосферную плазму, — распад свиста на свист и кинетическую альвеновскую волну [19, 20]. Оценки ожидаемых амплитуд полей альвеновских волн, генерируемых в этом распадном процессе, дают для экваториальной области магнитосферы на  $L=3-4$  величину порядка единиц нТл при мощности ОНЧ-передатчика  $\sim 1$  МВт. Процессы нагрева электронов из-за затухания Ландау должны включаться, когда косая альвеновская волна при распространении в магнитосфере достигает областей, где альвеновская скорость приближается к тепловой электронной ( $v_A \approx 2v_{te}$ ) в соответствии с механизмом [6].

**6. Заключение.** Таким образом, прямые измерения с борта ИСЗ «ИК-Б-1300» во время сильной магнитной бури 2.III 1982 г. показали, что в областях повышенной интенсивности эмиссии  $H_\beta$  и 630 нм [OI] наблюдаются квазипоперечные потоки ионов с  $E=0,5-5$  кэВ и интенсивностью до  $3 \cdot 10^8$  ( $\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{кэВ}$ ) $^{-1}$ , ОНЧ-излучения на частотах 5–15 кГц и квазипостоянные электрические поля величиной до 50 мВ/м. На основе данных о локализации наблюдавшихся нами максимумов интенсивности  $H_\beta$ -эмиссий, а также [1, 2] о неоднородном долготном распределении интенсивности SAR-дуг сделано предположение о возможности искусственной стимуляции (или интенсификации) этих эмиссий в ограниченных областях ионосферы при воздействии на ионосферу электромагнитного излучения наземных ОНЧ-передатчиков.

Рассмотрены три нелинейных процесса, которые могут приводить к стимуляции ускорения ионов и нагрева электронов в верхней ионосфере интенсивными свистовыми волнами от наземных источников. Сделанное предположение согласуется с выводами [3, 4] о том, что механизм нагрева электронов, необходимых для возбуждения SAR-дуг, работает на высотах ниже или порядка 6000 км. Подтверждением важности учета наземных источников излучения является обнаруженный на ИСЗ «Ореол-3» эффект ускорения ионосферных ионов  $H^+$ ,  $He^+$  и  $O^+$  под действием сигналов низкочастотного передатчика [21]. Сформированные в указанных процессах потоки ускоренных ионов и сверхтепловых электронов могут рассматриваться как возможные источники искусственной стимуляции (или интенсификации) атмосферных эмиссий в областях интенсивного волнового (ОНЧ) воздействия.

Авторы благодарны О. А. Молчанову, Л. С. Евлашину, С. А. Черноусу, Е. Е. Титовой за обсуждение работы, а также Ю. И. Гальперину и Е. Е. Антоновой за ряд полезных критических замечаний.

1. *La Valle S. R., Elliot D. D.* // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. P. 1802.
2. *Rees M. H., Roble R. G.* // Rev. Geophys. and Space Phys. 1975. V. 13. P. 201.
3. *Guirgiolo C., Slater D. W., Winningham J. D., Burch J. L.* // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 9. P. 965.
4. *Kozyra J. U., Cravens T. E., Nagy A. F. et al.* // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 9. P. 973.
5. *Cornwall J. M., Coroniti F. V., Thorne R. M.* // Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 4428.
6. *Hasegawa A., Mima K.* // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 1117.
7. *Чмырев В. М., Ролдугзин В. К., Жулин И. А. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 23. С. 452.
8. *Жулин И. А., Ляхов С. Б., Майоров А. Д. и др.* // Докл. АН СССР. 1976. Т. 230. С. 1073.
9. *Karman V. I., Shklyar D. R.* // Planet. Space Sci. 1977. V. 25. P. 395.
10. *Inan U. S., Chang H. C., Helliwell R. A.* // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 2891.
11. *Ковражкин Р. А., Могилевский М. М., Молчанов О. А. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. С. 193.
12. *Inan U. S., Helliwell R. A.* Results of the ARCAD-3 project and of the recent programmes in magnetospheric and ionospheric physics. Toulouse, CREIDVES edition. 1984. P. 599.
13. *Молчанов О. А.* Низкочастотные волны и индуцированные излучения в магнитосфере Земли. М.: Наука, 1985. 244 с.
14. *Капитанов В. Я., Чмырев В. М.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. С. 659.
15. *Lee M. C., Kuo S. P.* // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 10873.
16. *Trakhtengeriz V. Yu.* // Planet. Space Sci. 1973. V. 21. P. 359.
17. *Грач С. М.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. С. 1627.
18. *Литвак А. Г., Трахтенгерц В. Ю.* // ЖЭТФ. 1972. Т. 61. С. 228.
19. *Antani S. N., Kaup D. J., Shukla P. K.* // Phys. Fluids. 1983. V. 26. P. 483.
20. *Тараненко Ю. Н., Чмырев В. М.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т. 27. С. 664.
21. *Джорджио Н. В., Могилевский М. М., Чмырев В. М. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. С. 322.

Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн АН СССР

Институт космических исследований  
АН СССР

Научно-исследовательский институт ядерной физики  
Московского государственного университета

Институт космических исследований  
Болгарской Академии наук

Поступила в редакцию  
29.XII 1987