

УДК 533.9+550.348

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ РИДБЕРГОВСКИХ АТОМОВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЕЁ МОДИФИКАЦИИ МОЩНЫМИ КОРОТКИМИ РАДИОВОЛНАМИ

А. В. Троицкий^{1*}, *В. Л. Фролов*^{1,2}, *А. В. Востоков*¹, *И. В. Ракуть*¹

¹ Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Приводятся результаты исследований радиоизлучения ридберговских состояний атомов и молекул верхней атмосферы Земли на ионосферных высотах при воздействии на неё мощными короткими радиоволнами, излучаемыми стендом «Сура». Обнаружено радиоизлучение верхней атмосферы, обусловленное эмиссией высоковозбуждённых ридберговских атомов и молекул с главным квантовым числом $n = 163 \div 169$ и $n = 225$ (дециметровый диапазон длин волн) и две спектральные особенности, совпадающие с частотами переходов между ридберговскими состояниями $m = 169 \rightarrow n = 168$ с частотой перехода $\nu_n = 1375,35$ МГц и $m = 166 \rightarrow n = 165$ с $\nu_n = 1451,5$ МГц. Характерные высоты области генерации ридберговского излучения составляли $150 \div 250$ км. Интенсивность радиоизлучения соответствует $10 \div 45$ К, что сравнимо с интенсивностью радиоизлучения, генерируемого при солнечных вспышках.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера, как любое нагретое тело, излучает электромагнитную энергию в широком диапазоне длин радиоволн. Это тепловое излучение имеет флуктуационный характер и создаётся хаотическими движениями заряженных частиц с максвелловским распределением их скоростей. Интенсивность теплового излучения ионосферы в масштабе радиоярких температур составляет в метровом и дециметровом диапазонах единицы и десятые доли градусов соответственно [1]. При этом температура электронов в ионосфере равна $1000 \div 1500$ К. При воздействии на F_2 -область ионосферы мощными короткими радиоволнами с обыкновенной поляризацией вблизи высоты их отражения происходит значительный нагрев электронов плазмы до температур $3000 \div 4500$ К. Соответственно имеет место усиление интенсивности теплового излучения в дециметровом и метровом диапазонах длин волн.

В работах [2, 3] было обнаружено мощное спорадическое сверхвысокочастотное (СВЧ) радиоизлучение ионосферы в широком диапазоне сантиметровых и дециметровых волн, интенсивность которого отвечала десятками градусов яркостной температуры. Было установлено, что это излучение коррелирует с всплесками солнечной активности и связанными с ними геомагнитными возмущениями [4, 5]. Только 25 лет спустя природа этого явления была объяснена в работе [6] на основе ридберговского механизма излучения нейтральных атомов и молекул на ионосферных высотах. Данный механизм включает в себя переходы электронов между высоковозбуждёнными (главное квантовое число $n > 10$) ридберговскими уровнями нейтральных атомов и молекул ионосферы, возбуждёнными при их столкновении с потоком солнечных частиц с высокой энергией. Отметим, что радиолинии излучения, соответствующие переходам между ридберговскими состояниями вплоть до $n \approx 300$, наблюдались в галактических областях ионизированного водорода H II и в планетарных туманностях [7]. Аналогичный механизм, но на ускоренных электронах нагретой мощным коротковолновым излучением ионосферной плазмы, использовался для интерпретации искусственного излучения ионосферы в дециметровом диапазоне волн [8]. Детальное

* avtroitsky@yandex.ru

рассмотрение коллективных ридберговских состояний в верхней атмосфере Земли выполнено в работе [9].

После обнаружения стимулированного нагревом ионосферы высыпания высокоэнергичных электронов из радиационных поясов Земли встала задача обнаружения возможности возбуждения ридберговских состояний атомов и молекул на ионосферных высотах при работе мощных источников радиоизлучения.

В предлагаемой работе обсуждаются результаты выполненных в последние годы экспериментальных исследований ридберговского излучения нейтральной компоненты ионосферы, стимулированного мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура», расположенным в средних широтах в 130 км к востоку от г. Нижнего Новгорода.

1. РИДБЕРГОВСКИЕ АТОМЫ В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Ридберговскими называются такие высоковозбуждённые состояния атомов и молекул, которые расположены вблизи порога ионизации и характеризуются бесконечной последовательностью энергетических уровней в припороговой области энергий. Ридберговские атомы и молекулы обладают одним высоковозбуждённым слабосвязанным электроном. При экстремально большом возбуждении атом (молекула) может рассматриваться как макроскопический объект, т. к. при $n = 1000$ его размер, определяемый радиусом орбиты электрона, равен $r_n \approx 10^{-8}n^2 \approx 10^{-2}$ см. Следовательно, ридберговский атом (молекулу) можно представить как положительно заряженный ионный остов и ридберговский электрон. При этом для многих задач остов можно считать точечным положительным зарядом, а в качестве модели ридберговского атома рассматривать водородоподобный атом. В такой модели энергии ридберговских состояний изолированного атома, отсчитанные от энергии ионизации, определяются формулой Ридберга

$$E_n = R(1 - m_e/M)(n - \delta)^{-2}, \quad (1)$$

где $R = 13,6058$ эВ — энергетическая постоянная Ридберга, m_e — масса электрона, M — масса ядра, δ — квантовый дефект заряда ядра, вклад которого при больших n пренебрежимо мал.

Ридберговские состояния метастабильны: время жизни ридберговского атома для $n = 1000$ составляет $\tau_n \approx 10^{-8}n^3 \approx 10$ с. Частота переходов между ридберговскими уровнями $m \rightarrow n$ определяется выражением

$$\nu = R_\nu(1 - m_e/M)(1/n^2 - 1/m^2), \quad (2)$$

где $R_\nu = 3,289842 \cdot 10^{15}$ Гц — спектроскопическая постоянная Ридберга. Из (2) следует, что переходы между соседними состояниями $(n + 1) \rightarrow n$ отвечают частотам радиоволн $\nu_n \approx 2R_\nu n^{-3}$, которые лежат в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах при $n \approx 25 \div 60$, в сантиметровом — при $n \approx 60 \div 130$ и в дециметровом — при $n \approx 130 \div 280$. Особо следует отметить, что расстояние между соседними ридберговскими линиями $\Delta\nu_n$ составляет в сантиметровом диапазоне $\Delta\nu_{103} \approx 170$ МГц, в дециметровом $\Delta\nu_{221} \approx 8$ МГц, а в метровом диапазоне при $n > 300$, с учётом различных факторов уширения линии (соударения, эффекты Доплера, Зеемана и др.), спектр излучения становится практически сплошным.

В табл. 1 для сравнения приведены основные характеристики атомов, находящихся в первом возбуждённом состоянии $n = 2$, и ридберговских атомов с $n = 1000$.

Отметим, что концентрация нейтральных атомов и молекул (N_2 , O_2 и O) в F_2 -слое ионосферы составляет $N_a \approx 10^9$ см $^{-3}$, что соответствует расстоянию между ними около 10^{-3} см. Эта величина сопоставима с размерами ридберговских атомов и молекул при $n > 300$. В этом случае их орбиты начинают соприкасаться, что приводит к значительному усилению столкновительных

и радиационных взаимодействий между ними, играющих большую роль в физико-химических процессах в атмосфере Земли. Кроме того, на ионосферных высотах время жизни ридберговских состояний атомов и молекул τ определяется частотой их соударений с электронами $\nu \sim 500 \text{ с}^{-1}$, что соответствует $\tau \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Основные естественные механизмы образования ридберговских состояний на высотах ионосферы включают в себя процессы фотовозбуждения при поглощении солнечного жёсткого ультрафиолетового излучения, возбуждения при столкновении с атомами и молекулами атмосферы энергичных электронов солнечных вспышек и электронов, высыпающихся из радиационных поясов Земли при сильных геомагнитных возмущениях, а также диссоциативное возбуждение. Поскольку потенциал ионизации основных атомов и молекул атмосферы на ионосферных высотах N_2 , O_2 и O равен 15,5; 12,2 и 13,62 эВ соответственно, что много меньше энергии указанных процессов, последние вполне могут возбудить атомы и молекулы вплоть до предыонизационных уровней и даже ионизировать их. Далее в процессе перехода ридберговских атомов и молекул в нижние состояния излучается широкий спектр электромагнитных волн от радиодиапазона до ультрафиолетового излучения. Согласно экспериментальным данным [2–5], интенсивность этого излучения в дециметровом диапазоне длин волн сопоставима или даже превосходит типичные уровни всплесков радиоизлучения Солнца во время солнечных вспышек. Микроволновая составляющая ридберговского излучения практически без потерь достигает тропосферы Земли и может приводить к изменению физических характеристик приземной атмосферы (см., например, [10–12]).

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе рассматривается искусственный механизм образования ридберговских состояний на высотах ионосферы Земли, обусловленный воздействием мощными короткими радиоволнами на плазму F_2 -слоя ионосферы (высоты 200–300 км). В его основе лежит модификация ионосферной плазмы мощными радиоволнами с обыкновенной поляризацией, когда вблизи высоты их отражения развиваются различные плазменные неустойчивости, приводящие к возбуждению интенсивной плазменной турбулентности (плазменные волны, искусственные ионосферные неоднородности и др.), что, в конечном итоге, приводит к сильному разогреву плазмы, когда температура электронов T_e в ней может увеличиться в 2–3 раза [13–16]. Такое увеличение T_e , а также ускорение фоновых электронов в областях с интенсивной высокочастотной плазменной турбулентностью приводят к появлению электронов с энергиями до 5–30 эВ [14, 15]. Эти «горячие» электроны имеют энергию выше потенциала ионизации N_2 , O_2 , O и, соударяясь с ними, могут перевести их в высоковозбуждённое ридберговское состояние или вызвать дополнительную искусственную ионизацию атмосферы. Как показали недавно выполненные исследования [17], высокоэнергичные электроны с $E \approx 100 \text{ кэВ}$ могут появляться на высотах ионосферы за счёт их высыпания из радиационного пояса Земли, стимулированного нагревом F_2 -области мощными радиоволнами. Эти электроны, как и в случае солнечной радиации, в результате их многократных столкновений с атомами и молекулами атмосферы могут также переводить их в высоковозбуж-

Таблица 1. Основные параметры ридберговских состояний атомов (примерные значения) в сравнении с основным состоянием ($n = 2$)

	Главное квантовое число n	2	1000
1	Энергия связи электрона в атоме (потенциал ионизации), эВ	5	10^{-5}
2	Размер атома (радиус орбиты электрона), см	10^{-8}	10^{-2}
3	Период обращения электрона по орбите, с	10^{-15}	10^{-6}
4	Естественное время жизни, с	10^{-8}	10
5	Частота переходов между соседними состояниями, МГц	10^9	1

Таблица 2. Технические характеристики радиометрического комплекса

	Характеристика приёмника	Радиометр, $\lambda \sim 20$ см	Радиометр, $\lambda \sim 52$ см
1	Частота приёма, МГц	1 350 ÷ 1 500	574
2	Затухание вне полосы приёма, дБ	45	35
3	Количество каналов	10	1
4	Полоса пропускания канала, МГц	15	5
5	Интервал между каналами, МГц	15	—
6	Флуктуационная чувствительность, К	0,20	0,15
7	Частота модуляции, кГц	1	1
8	Время интегрирования сигнала, с	1	1
9	Ширина диаграммы направленности приёмной антенны, градусы	14	15

дённые ридберговские состояния. На следующем этапе, вследствие соударений ридберговских атомов с низкоэнергичными электронами и нейтральными атомами, а также спонтанно, происходят переходы в нижние энергетические состояния с излучением широкого спектра электромагнитных волн.

Исследование характеристик СВЧ излучения, формирующегося на ионосферных высотах при модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами, излучаемыми среднеширотным нагревным стендом «Сура» (НИРФИ ННГУ, Нижний Новгород), проводилось в 2014–2018 годах. Стенд излучал волны с обыкновенной поляризацией на частотах в диапазоне 4,3 ÷ 6,8 МГц, как правило, в режиме [10 ÷ 15 мин — излучение, 10 ÷ 15 мин — пауза] с эффективной мощностью 80 ÷ 180 МВт, которая увеличивалась с ростом частоты волны накачки $f_{ВН}$. Антенна стенда «Сура» имеет размеры 300 × 300 м, ширина её диаграммы направленности составляет около 14° на частотах волны накачки около 5 МГц. Как правило, пучок мощных радиоволн излучался под углом 12° на юг от вертикали (в область магнитного зенита), чтобы увеличить эффективность модификации ионосферы за счёт эффекта «магнитного зенита» [14–16]. Следует отметить, что все рассматриваемые в работе измерения выполнялись в спокойных и очень спокойных геомагнитных условиях, когда суммарный индекс геомагнитной активности ΣK_p не превышал 20, причём спокойными были не только дни измерений, но и несколько предыдущих дней.

Измерения интенсивности СВЧ радиоизлучения атмосферы осуществлялись с помощью спектральных радиометрических приёмников модуляционного типа (радиометров) дециметрового диапазона волн на частотах $f_1 = 1 \div 2$ ГГц и $f_2 = 574$ МГц. Технические характеристики радиометрического комплекса приведены в табл. 2. Комплекс размещался на территории стенда «Сура». Приём радиоизлучения осуществлялся на антенны рупорного и параболического типов. Пространственная ориентация диаграмм направленности антенн радиометров и стенда «Сура» совпадала. Калибровка принимаемого радиоизлучения в масштабе яркостных температур осуществлялась по двум источникам излучения, находящимся в дальней зоне антенн: небо (яркостная температура в зените $T_{\text{я}} \approx 3$ К) и поверхность Земли с растительностью ($T_{\text{я}} \approx T_0$, где T_0 — приземная температура воздуха).

На рис. 1 и 2 представлены примеры регистрации интенсивности радиоизлучения атмосферы (в масштабе яркостных температур) в полосе спектрального канала $f_1 = (1\,450 \pm 8)$ МГц, которому соответствует частота $\nu_n = 1\,451,5$ МГц перехода между ридберговскими состояниями $m = 166 \rightarrow n = 165$. Частота мощной радиоволны накачки составляла $f_{ВН} = 4\,300$ кГц для случая рис. 1 и $f_{ВН} = 5\,828$ кГц для рис. 2; в обоих случаях режим работы стенда был [10 мин — излучение, 10 мин — пауза]. Здесь и далее на рисунках время работы стенда «Сура» отмечено красными прямоугольниками вдоль оси времени. Вертикальный отрезок со стрелкой слева на рисунках

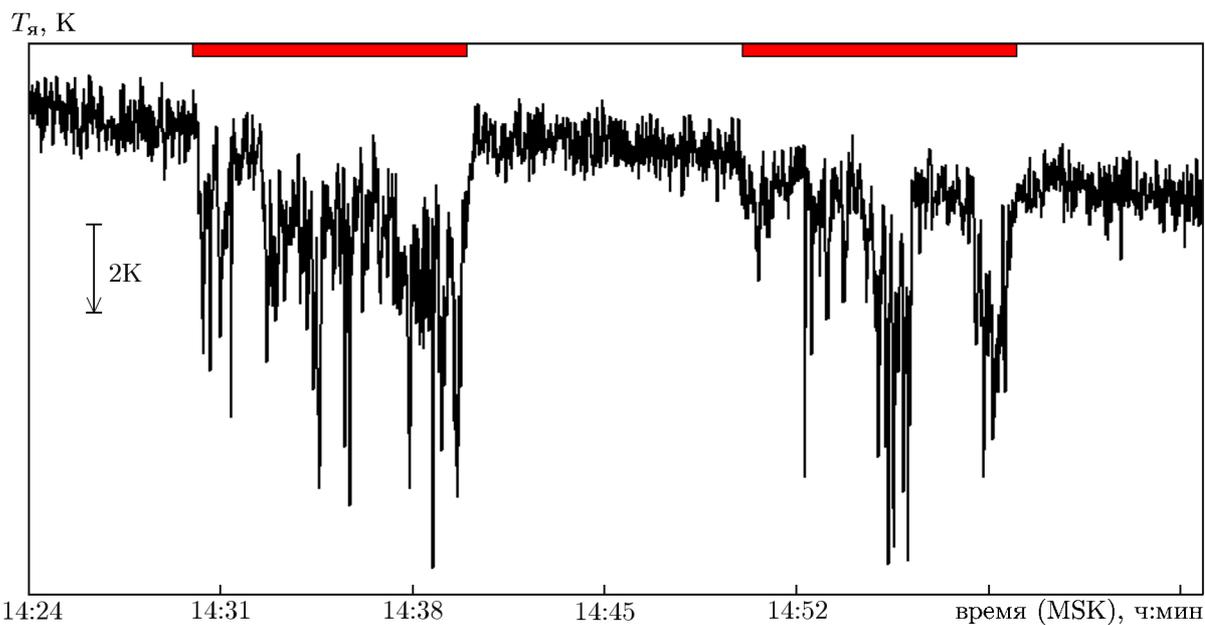


Рис. 1. Интенсивность радиоизлучения атмосферы 08.09.2014 в полосе спектрального канала $f = (1450 \pm 8)$ МГц. На рис. 1–3 увеличение яркостной температуры отвечает направлению вниз

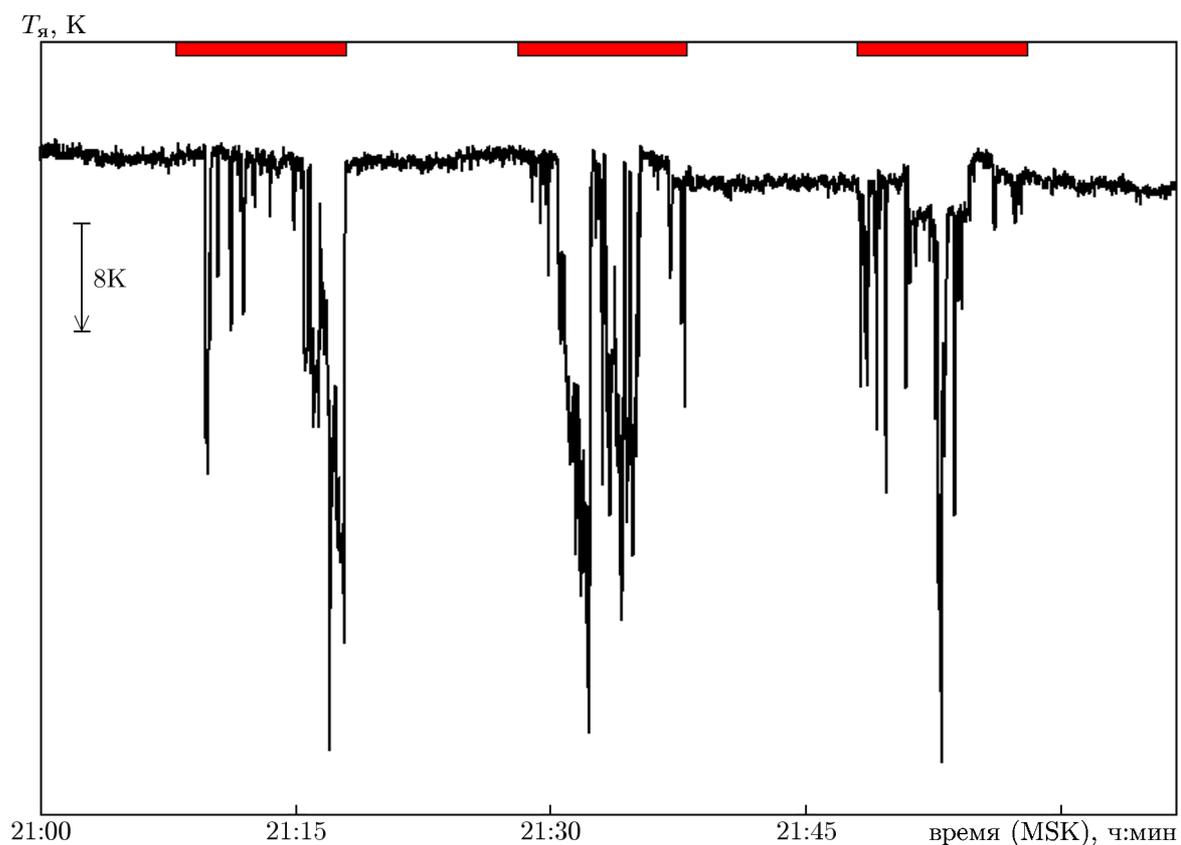


Рис. 2. Интенсивность радиоизлучения атмосферы 28.03.2014 в полосе спектрального канала $f = (1450 \pm 8)$ МГц

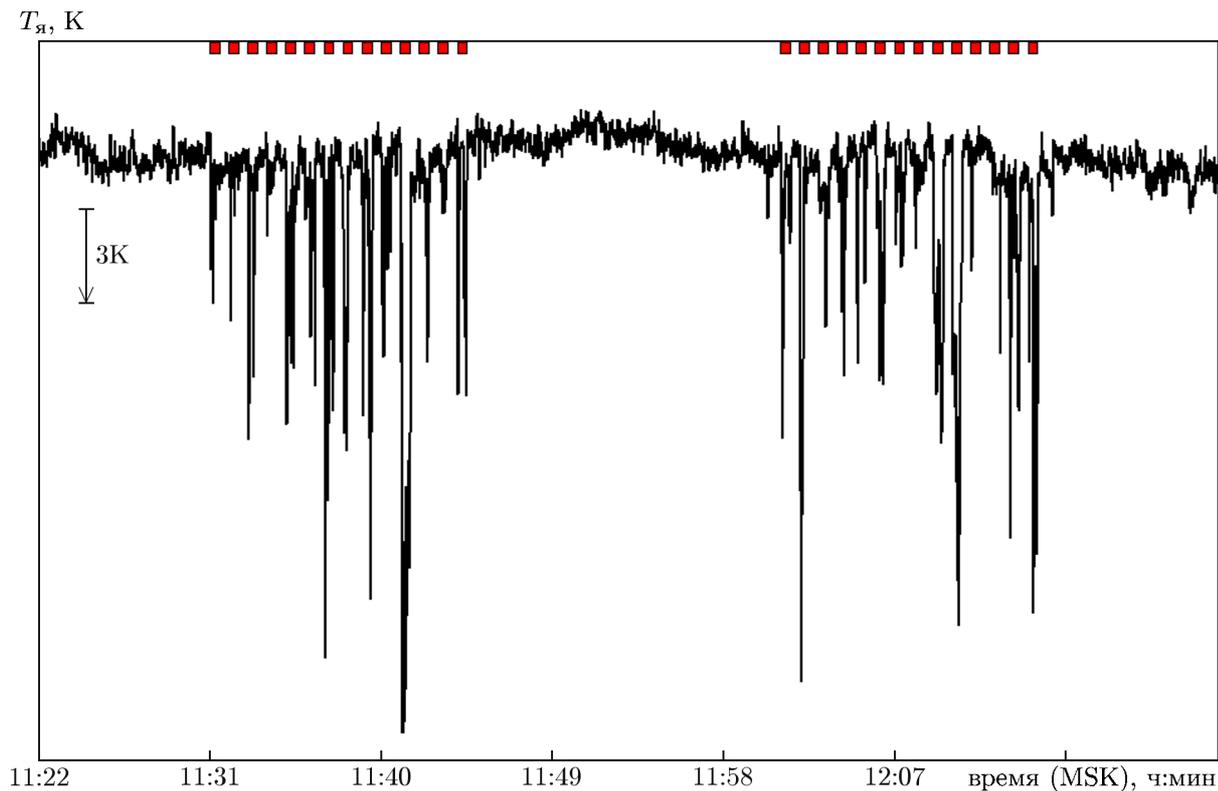


Рис. 3. Интенсивность радиоизлучения атмосферы 29.08.2018 в полосе спектрального канала $f = (574 \pm 3)$ МГц

показывает масштаб изменения яркостной температуры и направление её увеличения. В первом случае (рис. 1) измерения проводились 8 сентября 2014 года в послеполуденные часы. Здесь была зарегистрирована минимальная во всех эксперимента пиковая интенсивность ридберговского излучения с $\Delta T_{\text{я}} \approx 9$ К. Во втором случае эксперимент проводился 28 марта 2014 года в поздние вечерние часы. В этом случае наблюдалась максимальная пиковая интенсивность ридберговского излучения с $\Delta T_{\text{я}} \approx 43$ К.

На рис. 3 приведена типичная запись измерения интенсивности радиоизлучения атмосферы в полосе спектрального канала $f_2 = (574 \pm 3)$ МГц, которому соответствует частота $\nu_n = 573,81$ МГц перехода между ридберговскими состояниями $m = 226 \rightarrow n = 225$. Волна накачки излучалась на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц, режим работы стенда был [14 мин — излучение (по схеме 30 с вкл., 30 с выкл.), 16 мин пауза]. Можно видеть, что наибольшая интенсивность микроволнового излучения часто регистрировалась в начале 30-секундного импульса накачки, что является следствием «overshoot-эффекта», который обычно наблюдается при развитии искусственной ионосферной турбулентности [16].

За период исследований всего было выполнено 11 циклов воздействия мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура» на ионосферу. Результаты радиометрических измерений интенсивности радиоизлучения ридберговских атомов и молекул верхней атмосферы приведены в табл. 3. В 7 циклах зарегистрировано ридберговское излучение атомов и молекул верхней атмосферы в дециметровом диапазоне длин волн с пиковой интенсивностью, отвечающей $\Delta T_{\text{я}} \approx 10 \div 26$ К в утренние и послеполуденные часы и $\Delta T_{\text{я}} \approx 30 \div 43$ К в поздние вечерние и ночные часы. Эти значения хорошо согласуются с полученными в работах [3, 4] результатами измерения интенсивности естественного спорадического излучения ионосферы во время солнечных вспышек

Таблица 3. Результаты измерений радиоизлучения атмосферы на частотах $f_1 = (1450 \pm 8)$ МГц (строки 1–5) и $f_2 = (574 \pm 3)$ МГц (строки 6, 7)

	Дата, время	$f_{\text{ВН}}$, кГц (f_{0F_2} , МГц); режим работы	Высота отражения волны накачки $h_{\text{ОТР}}$, км	Интенсивность радиоизлучения (пиковая) $\Delta T_{\text{я}}$, К
1	27.03.2014 21:21÷22:11	5 828 (7,2 → 6,4); [+9 мин, -1 мин]	240 → 270	30
2	28.03.2014 20:28÷22:23	5 828 (8,4 → 6,5); [±10 мин]	220 → 255	43
3	29.03.2014 00:50÷01:10	4 300 (5,6); [несущая]	260	38
4	08.09.2014 14:10÷15:20	4 300 (-); [±10 мин]	155 → 185	9
5	02.04.2015 17:53÷20:33	6 720 (8,2 → 6,9); [+10 мин, -5 мин]	220 → 285	23
6	29.08.2018 10:01÷12:50	4 300 (4,5); [14 мин × (±30 с), -16 мин]	195	20
7	30.08.2018 09:30÷12:00	4 300 (4,9); [+14 мин, -16 мин]	175	26

и почти в 20÷30 раз превышают результаты измерений интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы в дециметровом диапазоне длин волн, зарегистрированного в работе [8].

Расхождение с результатами работы [8] могут определяться следующими факторами. Схема измерений в [8] существенно отличалась от используемой в данной работе. В нашем случае пространственная ориентация диаграмм направленности антенн радиометров и стенда «Сура» полностью совпадали. Поэтому по высоте вся область высоковозбуждённых ридберговских атомов и молекул автоматически попадала в диаграмму направленности радиометров. В работе [8] радиометр находился на расстоянии примерно 110 км на запад от стенда и угол места области высоковозбуждённых атомов и молекул был априорно неизвестен. Поэтому область локации могла не совпадать с областью наиболее интенсивной генерации ридберговского излучения. Нельзя также исключить, что в работе [8] увеличение интенсивности излучения было связано с тепловым излучением плазмы, которое достигает десятых долей градуса в условиях её разогрева мощной радиоволной на частоте регистрации 600 МГц.

На рис. 4 приведён нормированный спектр интенсивности радиоизлучения атмосферы в диапазоне частот 1 350÷1 500 МГц с разрешением 15 МГц, полученный 2 апреля 2015 года при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура» на частоте волны накачки $f_{\text{ВН}} = 6 720$ кГц. В спектре хорошо различаются два спектральных максимума, совпадающие с частотами переходов между ридберговскими состояниями $m = 169 \rightarrow n = 168$ с $\nu_n = 1 375,35$ МГц и $m = 166 \rightarrow n = 165$ с $\nu_n = 1 451,5$ МГц. Отметим, что в исследуемом диапазоне частот расположены 5 ридберговских линий. Отсутствие выраженных спектральных особенностей для трёх других линий можно объяснить неточным совпадением частоты спектральной линии с частотой канала спектроанализатора.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружен новый канал воздействия на нейтральную атмосферу через возбуждение ридберговских состояний нейтральных атомов и молекул при модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами и генерацию микроволнового излучения. Определены характеристики

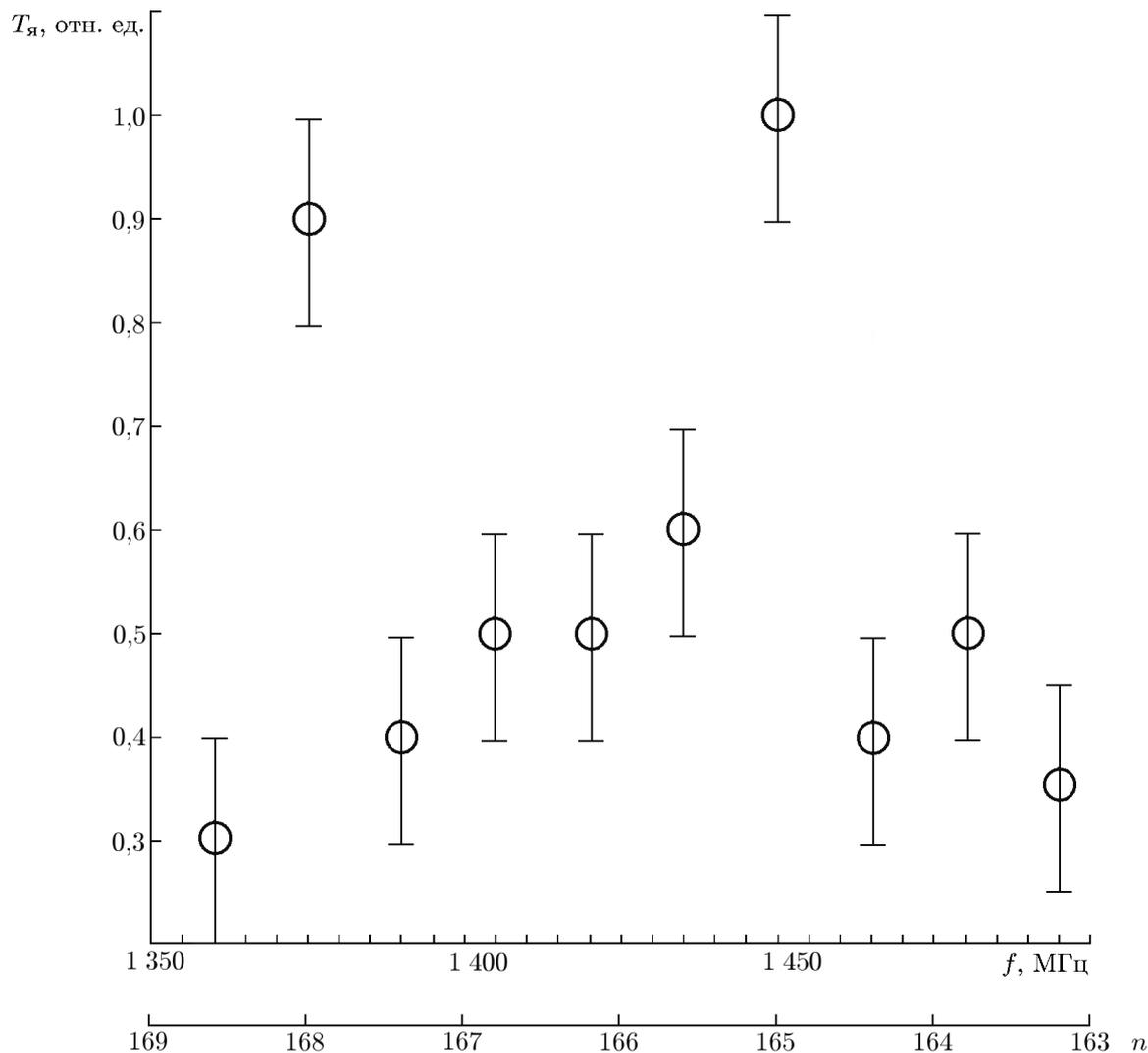


Рис. 4. Нормированный спектр интенсивности радиоизлучения атмосферы 02.04.2015 в диапазоне частот 1350÷1500 МГц с разрешением 15 МГц

микроволнового радиоизлучения верхней атмосферы, обусловленного эмиссией высоковозбуждённых ридберговских атомов и молекул с главными квантовыми числами $n = 163 \div 169$ и $n = 225$ (дециметровый диапазон длин волн). Интенсивность радиоизлучения составила величину, соответствующую 10÷45 К, с большими её значениями в поздние вечерние и ночные часы, когда имеет место наиболее эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой F_2 -области ионосферы, приводящее к ускорению электронов до сверхтепловых энергий [14–16] и к интенсивному высыпанию энергичных электронов из радиационного пояса Земли [17]. Результаты выполненных исследований доказывают действенность механизма образования высоковозбуждённых ридберговских состояний атомов и молекул в ионосфере при её модификации мощными короткими радиоволнами, а также на существование ридберговского канала генерации микроволнового радиоизлучения на ионосферных высотах, по интенсивности сравнимого с радиоизлучением, генерируемым при солнечных вспышках. Важно подчеркнуть, что это излучение, свободно распространяясь вниз до земной поверхности, влияет на процессы, проходящие в мезосфере, термосфере и в тропосфере.

Исследования выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки (грант 3.1844.2017/4.6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бенедиктов Е. А., Коробков Ю. С., Митяков Н. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1960. Т. 3, № 6. С. 957.
2. Троицкий В. С., Бондарь Л. Н., Стародубцев А. М. // Докл. АН СССР. 1973. Т. 212, № 3. С. 719.
3. Троицкий В. С., Стародубцев А. В., Бондарь Л. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 3. С. 323.
4. Бондарь Л. Н., Стержнева К. М., Троицкий В. С. // Астроном. вестник. 1975. Т. 9, № 4. С. 210.
5. Мусатенко С. И. // Геомагнетизм и аэрномия. 1980. Т. 20, № 5. С. 884.
6. Авакян С. В., Серова А. Е., Воронин Н. А. // Геомагнетизм и аэрномия. 1997. Т. 37, № 3. С. 99.
7. Сороченко Р. Л., Гордон М. А. Рекомбинационные радиолинии. Физика и астрономия. М.: Физматлит, 2003. 391 с.
8. Grach S. M., Fridman V. M., Lifshits L. M., et al. // Ann. Geophysikae. 2002. V. 20, No. 10. P. 1 687.
9. Голубков М. Г. Коллективные ридберговские состояния в верхней атмосфере Земли: Дис. . . . д-ра физ.-мат. наук. ФИЦ ХФ РАН, Москва. 2015.
10. Крауклис В. Л., Никольский Г. А., Сафронова М. М., Шульц Э. О. // Опт. атмосферы. 1990. Т. 3, № 3. С. 227.
11. Авакян С. В., Воронин Н. А. // Исследование Земли из космоса. 2007. № 2. С. 28.
12. Авакян С. В., Троицкий А. В., Черноус С. А. // Труды 17-ой Всес. научно-техн. конф. «Актуальные вопросы защиты и безопасности». С.-Петербург, 2–3 апреля 2014 года. С. 116.
13. Gurevich A. V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York: Springer, 1978. 372 p.
14. Гуревич А. В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1 145.
15. Streltsov A. V., Berthelier J.-J., Chernyshov A. A., et al. // Space Sci. Rev. 2018. V. 214, No. 8. P. 118.
16. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Н. Новгород: Изд. ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2017. 468 с.
17. Фролов В. Л., Акчурин А. Д., Болотин И. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 9. С. 641.

Поступила в редакцию 17 мая 2019 г.; принята в печать 30 октября 2019 г.

RADIO EMISSION OF RYDBERG ATOMS IN THE UPPER ATMOSPHERE MODIFIED BY HIGH-POWER HF RADIO WAVES

A. V. Troitskii, V. L. Frolov, A. V. Vostokov, and I. V. Rakut'

The report on the results of studying the radio emission of the Rydberg states of atoms and molecules in the Earth's upper atmosphere at ionospheric altitudes when the ionosphere is modified by high-power HF radio waves radiated by the Sura heating facility. Radio emission from the upper atmosphere, caused by the emission of highly excited Rydberg atoms and molecules with the principal quantum number $n = 163$ – 169 and $n = 225$ (decimeter wavelength range) and two spectral features that coincide with the frequencies of transitions between Rydberg states $m = 169 \rightarrow n = 168$ with

A. V. Троицкий, В. Л. Фролов, А. В. Востоков, И. В. Ракуть

the transition frequency $\nu_n = 1\,375.35$ MHz and $m = 166 \rightarrow n = 165$ with $\nu_n = 1451.5$ MHz were detected. Characteristic altitudes of the Rydberg radiation generation region were 150–250 km. The radio emission intensity corresponds to 10–45 K, which is comparable with the intensity of the radio emission generated during solar flares.