

Том II, с. 91-95

УДК: 504.3 + 533.1 + 533.9

## РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ РИДБЕРГОВСКИХ АТОМОВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ

**А. В. Троицкий, В. Л. Фролов, А. В. Востоков, И. В. Ракуть**

*Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского,  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Б.-Печерская 25/12а*

*E-mail: avtroitsky@yandex.ru*

**Аннотация.** Обсуждаются результаты выполненных в последние годы на стенде СУРА экспериментальных исследований свойств ридберговского излучения атомов и молекул нейтральной компоненты атмосферы Земли на ионосферных высотах при модификации верхней ионосферы мощным КВ радиоизлучением.

**Ключевые слова:** модификация ионосферы мощными КВ радиоволнами; ридберговское радиоизлучение; нейтральная атмосфера

## RADIO EMISSION OF RIDBERG ATOMS OF THE EARTH'S UPPER ATMOSPHERE DURING MODIFICATION OF THE IONOSPHERE BY POWERFUL HF RADIO WAVES

**A. V. Troitsky, V. L. Frolov, A. V. Vostokov, I. V. Rakut**

**Abstract.** The results of experimental studies of the properties of Rydberg radiation of atoms and molecules of the neutral component of the Earth's atmosphere at ionospheric altitudes, carried out in recent years when the ionosphere was modified by the high-power HF radio waves, are discussed.

**Keywords:** modification of the ionosphere by powerful HF radio waves; Rydberg radiation; neutral atmosphere

### Ридберговские атомы в ионосферной плазме

Ридберговскими называются такие высоковозбуждённые состояния атомов и молекул, которые расположены вблизи порога ионизации и характеризуются бесконечной последовательностью энергетических уровней, сходящихся к энергии ионизации. 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  $r_n \approx 10^{-8} \cdot n^2 \approx 10^{-2}$  см. При этом, ридберговский атом (молекула) может быть представлена как положительно заряженный ионный остов и ридберговский электрон, причём 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:

$$E_n = R \left(1 - \frac{m_e}{M}\right) \cdot (n - \delta)^{-2}, \quad (1)$$

где  $R = 13.6058$  эВ — постоянная Ридберга,  $m_e$  — масса электрона,  $M$  — масса ядра,  $\delta$  — квантовый дефект заряда ядра, вклад которого при больших  $n$  пренебрежимо мал. Ридберговские состояния метастабильны: время жизни ридберговского атома для  $n = 1000$  составляет  $\tau_n \approx 10^{-8} \cdot n^3 \approx 10$  с.

Частота переходов между ридберговскими уровнями  $m \rightarrow n$  определяется выражением:

$$\nu_n = R_\nu \left(1 - \frac{m_e}{M}\right) \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right), \quad (2)$$

где  $R_\nu = 3.289842 \cdot 10^{15}$  Гц. Из (2) следует, что переходы между соседними состояниями  $(n + 1) \rightarrow n$  отвечают частотам излучения 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 дециметровом — при  $n \approx 130 \div 280$ . Особо следует отметить, что расстояние между соседними ридберговскими линиями  $\Delta\nu_n$  составляет в сантиметровом диапазоне  $\Delta\nu_n 103 \approx 170$  МГц, в дециметровом —  $\Delta\nu_n 221 \approx 8$  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.

Отметим, что концентрация нейтральных атомов и молекул ( $N_2$ ,  $O_2$  и  $O$ ) в  $F$ -слое ионосферы  $N_a \approx 10^9$  см $^{-3}$ , что соответствует расстоянию между ними  $\sim 10^{-2}$  см. Эта величина сопоставима с размерами ридберговских атомов и молекул при  $n > 700$ . В этом случае их орбиты начинают соприкасаться, что приводит к значительному усилению столкновительных и радиационных взаимодействий между ними, которые играют большую роль в физико-химических процессах в атмосфере Земли.

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, высыпаящихся из радиационных поясов Земли при сильных геомагнитных возмущениях, диссоциативное возбуждение [1–3]. Поскольку потенциал ионизации основных атомов и молекул атмосферы на ионосферных высотах  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $O$  равен соответственно 15.5, 12.2 и 13.62 эВ, что много меньше энергии указанных процессов, последние вполне могут возбудить атомы и молекулы вплоть до предионизационных уровней и даже ионизировать их. Далее, в процессе спонтанного перехода ридберговских атомов и молекул в нижнее состояние излучается широкий спектр электромагнитных волн от радиоволн до ультрафиолетового излучения. Впервые такой тип излучения был обнаружен в работах [2, 3]. Согласно экспериментальным данным [2, 3], 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, где может влиять на погодно-климатические процессы, а именно — на механизмы конденсации водяного пара в атмосфере и образование водных кластеров (конденсационно-кластерный механизм) [4, 5].

### Методика и результаты измерений

В настоящей работе рассматривается искусственный механизм образования ридберговских состояний на высотах ионосферы Земли через воздействие мощными КВ радиоволнами на плазму  $F$ -слоя ионосферы (высоты 200 ÷ 300 км). В его основе лежит модификация ионосферной плазмы мощными радиоволнами  $O$ -поляризации, когда вблизи высоты их отражения развиваются различные плазменные неустойчивости, приводящие к возбуждению интенсивной плазменной турбулентности, что, в конечном итоге, приводит к сильному разогреву плазмы, а также к ускорению фоновых электронов до энергий 5 ÷ 30 эВ [6]. Эти ускоренные 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. На следующем этапе, как и в рассмотренном выше естественном механизме, происходят спонтанные переходы в нижние энергетические состояния с излучением широкого спектра электромагнитных волн.

Исследование характеристик СВЧ излучения, формирующегося на ионосферных высотах при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами, излучаемыми среднеширотным нагревным стендом СУРА (НИРФИ ННГУ, Нижний Новгород), проводилось в 2014 ÷ 2018 гг. Стенд излучал волны  $O$ -поляризации 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 увеличивается с ростом частоты волны накачки (ВН). Ширина диаграммы направленно-

сти антенны стенда СУРА, которая имеет размеры  $300 \text{ м} \times 300 \text{ м}$ , составляет  $\sim 14^\circ$  на частотах ВН  $\sim 5 \text{ МГц}$ .

Измерения интенсивности СВЧ радиоизлучения ионосферы проводилось с помощью спектральных радиометрических приёмников модуляционного типа (радиометров) дециметрового диапазона волн на частотах  $f_1 = 1-2 \text{ ГГц}$  и  $f_2 = 574 \text{ МГц}$ . Приёмный комплекс во время измерений размещался на территории стенда СУРА. Приём радиоизлучений осуществлялся на антенны рупорного и параболического типов с шириной диаграммы направленности  $14^\circ$  на  $f_1$  и  $\sim 35^\circ$  на  $f_2$ . Пространственная ориентация диаграмм направленности антенн радиометров и стенда СУРА совпала.

На рис. 1 представлен пример записи интенсивности радиоизлучения атмосферы (в масштабе яркостных температур) в полосе спектрального канала  $f = 1450 \pm 8 \text{ МГц}$ , которому соответствует частота  $\nu_n = 1451.5 \text{ МГц}$  перехода между ридберговскими состояниями  $\{m = 166 \rightarrow n = 165\}$ . Волна накачки излучалась на частоте  $f_{\text{ВН}} = 4300 \text{ кГц}$  в режиме [10 мин – излучение, 10 мин – пауза].

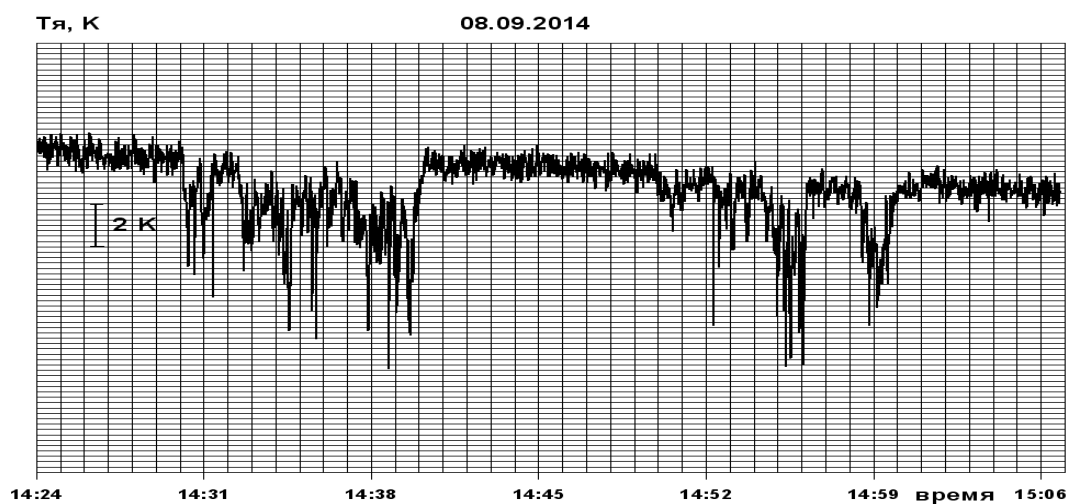


Рис. 1. Интенсивность радиоизлучения атмосферы (в масштабе яркостных температур) в полосе спектрального канала  $f = 1450 \pm 8 \text{ МГц}$ .

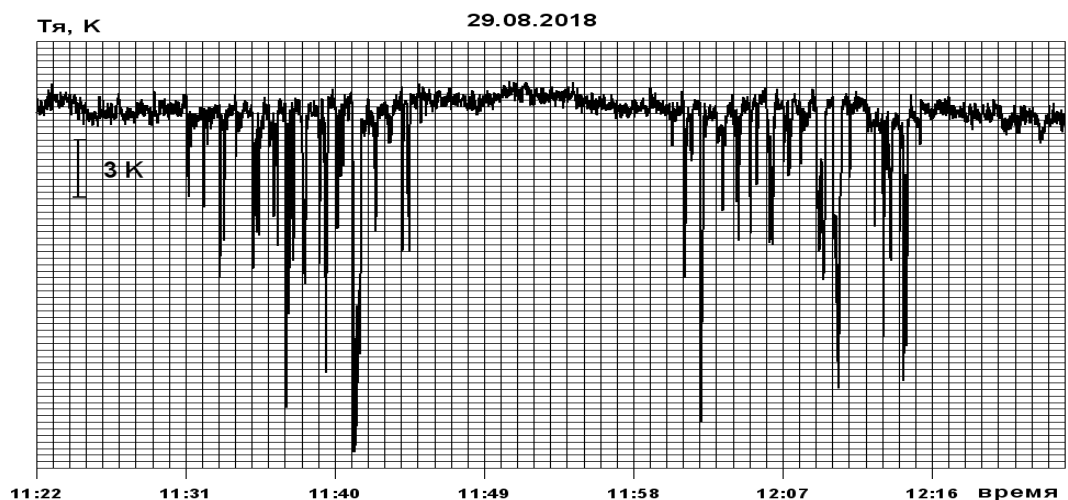


Рис. 2. Интенсивность радиоизлучения атмосферы в полосе спектрального канала  $f = 574 \pm 3 \text{ МГц}$ .

На рис. 2 приведена типичная запись измерения интенсивности радиоизлучения атмосферы в полосе спектрального канала  $f = 574 \pm 3$  МГц, которому соответствует частота  $\nu_n = 573.81$  МГц перехода между ридберговскими состояниями  $\{m = 226 \rightarrow n = 225\}$ . Волна накачки излучалась на частоте  $f_{ВН} = 4300$  кГц в режиме [14 мин – излучение (по схеме 30 с – вкл., 30 с – выкл.), 16 мин – пауза].

За период исследований всего было выполнено 11 циклов воздействия мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА на ионосферу. В 7 циклах зарегистрировано ридберговское излучение атомов и молекул верхней атмосферы в дециметровом диапазоне волн с пиковой интенсивностью от  $\Delta T_y \approx 10$  К до  $\Delta T_y \approx 40$  К. Эти значения хорошо согласуются с полученными в работах [2, 2] результатами измерения интенсивности естественного спорадического излучения ионосферы во время солнечных вспышек и почти в 30 раз превышает результаты измерений интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы в дециметровом диапазоне длин волн, зарегистрированного в работе [7].

На рис. 3 приведён нормированный спектр интенсивности радиоизлучения атмосферы в диапазоне частот  $1350 \div 1500$  МГц с разрешением 15 МГц, полученный 02.04.2015 г. при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением стенда СУРА на частоте волны накачки  $f_{ВН} = 6720$  кГц. В спектре хорошо различаются два спектральных максимума, совпадающие с частотами переходов между ридберговскими состояниями  $\{m = 169 \rightarrow n = 168\}$  с  $\nu_n = 1375.35$  МГц и  $\{m = 166 \rightarrow n = 165\}$  с  $\nu_n = 1451.5$  МГц. Отметим, что в исследуемом диапазоне частот расположены 5 ридберговских линий. Отсутствие выраженных спектральных особенностей для трёх других линий можно объяснить меньшим количеством ридберговских атомов и молекул на данных уровнях, а также вероятностью переходов не только на соседний уровень, но и на любой другой нижележащий уровень с излучением на более высокой частоте, не попадающей в полосу приёмника.

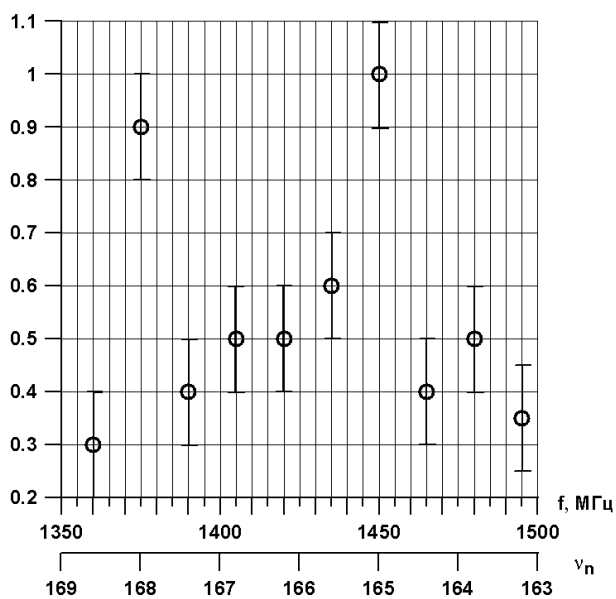


Рис. 3. Нормированный спектр интенсивности радиоизлучения атмосферы в диапазоне частот  $1350 \div 1500$  МГц с разрешением 15 МГц.

### Заключение

Результаты выполненных исследований доказывают действенность механизма образования высоковозбуждённых ридберговских состояний атомов и молекул в ионосфере при её модификации мощными КВ радиоволнами, а также на существование ридберговского канала генерации радиоизлучения на ионосферных высотах, по интенсивности сравнимого с радиоизлучением, генерируемым при солнечных вспышках. Микроволновое излучение такого высокого уровня способно запустить конденсационно-кластерный механизм воздействия на погоднo-климатические процессы. Таким образом, обнаружен новый канал воздействия на нейтральную атмосферу ускоренных электронов через возбуждение на ионосферных высотах ридберговских состояний нейтральных атомов и молекул.

### Благодарности

Исследования выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки (грант № 3.1844.2017/4.6).

### Список литературы

1. Авакян С. В., Серова А. Е., Воронин Н. А. Роль ридберговских атомов и молекул в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. — 1997. — Т. 37, № 3. — С. 99.
2. Троицкий В. С. и др. Поиск спорадического радиоизлучения из космоса на сантиметровых и дециметровых волнах. // Изв. Вузов. Радиофизика. — 1973. — Т. 16, № 3. — С. 323.
3. Бондарь Л. Н., Стержнева К. М., Троицкий В. С. Спорадическое радиоизлучение фона, солнечная активность и полярные сияния. // Астрономический вестник. — 1975. — Т. 9, № 4. — С. 210.
4. Авакян С. В., Воронин Н. А. О возможном физическом механизме воздействия солнечной и геомагнитной активности на явления в нижней атмосфере. // Исследование Земли из космоса, 2007. № 2, с. 28.
5. Авакян С. В., Троицкий А. В., Черноус С. А. Управление погодой и проблемы безопасности. // Труды 17-ой Всесоюзной научно-технической конференции «Актуальные вопросы защиты и безопасности». С.-Петербург, 2-3 апреля 2014 г. — С. 116.
6. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере. // УФН. — 2007. — Т. 177, № 11. — С. 1145–1177.
7. Grach S. M., Fridman V. M., Lifshits L. M. et al. UHF electromagnetic emission stimulated by HF pumping of the ionosphere. // Ann. Geophysikae. — 2002. — Vol. 20, No. 10. — P. 1687.