

УДК 53.01

ПРОТОНЫ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ КАК ИСТОЧНИК ВОДОРОДА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

В. Б. Лапшин*, М. С. Иванов, Н. Г. Котонаева**, В. А. Буров, А. Ю. Репин

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 17.09.2019 г.

Поступило 24.09.2019 г.

Предложен сценарий пополнения экзосферы Земли атомарным водородом космического происхождения. Наблюдаемое постоянство общего содержания водорода в экзосфере свидетельствует о том, что скорости пополнения водорода за счёт высыпаний из радиационных поясов и диссипации в космическое пространство совпадают по порядку величины. Основным источником водорода в экзосфере являются протоны солнечных и галактических космических лучей и солнечного ветра, захваченные радиационными поясами Земли. Основной областью пополнения экзосферы водородом являются область Южно-Атлантической магнитной аномалии и частично полярные зоны.

Ключевые слова: атомарный водород, экзосфера Земли, протоны солнечных и галактических космических лучей и солнечного ветра.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524895502-505>

1. ВВЕДЕНИЕ

Диссипация экзосферы Земли приводит к улетучиванию её газовых составляющих в космическое пространство. В связи с этим встаёт вопрос об источниках восстановления экзосферы. Нижняя и средняя части экзосферы в основном состоят из атомов кислорода и азота, с увеличением же высоты быстро растёт относительная концентрация лёгких газов. На высотах свыше 1300 км основными компонентами становятся атомарный водород и гелий [1].

Источниками водорода в атмосфере Земли обычно принято считать: фотодиссоциацию водяных паров из метановых образований под воздействием ультрафиолетового излучения и космических лучей, выделение водорода в результате вулканической деятельности и в процессе синтеза в земной коре, а также в результате выветривания минералов и разложения органических остатков [2, 3].

Авторы выносят на обсуждение гипотезу о существовании ещё одного источника пополнения водорода экзосферы Земли за счёт энергичных протонов радиационных поясов Земли, которые после термализации становятся ионами водорода.

2. ПРОНИКНОВЕНИЕ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ В РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА

Проникновение энергичных частиц в радиационные пояса Земли осуществляется по двум сценариям. В первом случае за счёт того, что протоны галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ) больших энергий, свободно пронизывая магнитосферу, генерируют в атмосфере поток вторичного излучения, включая нейтроны. Часть вторичных нейтронов распадается на электроны и протоны, которые пополняют радиационные пояса. Во втором случае радиационными поясами улавливаются ускоренные до больших энергий частицы плазмы магнитосферы Земли. Ускорение плазмы в магнитосфере в основном происходит в период геомагнитных бурь [4]. Численные характеристики плотности потоков частиц (протонов и электронов) в радиационных поясах Земли показаны на рис. 1 [4].

Заряженные частицы в ловушке радиационного пояса совершают сложные движения, дрейфуя вокруг Земли, совершают ларморовское вращение вокруг силовой линии и осцилляции между магнито-сопряжёнными точками [5]. Время жизни частицы в процессе движения определяется питч-угловой диффузией. Питч-угол равен нулю, когда частица движется строго вдоль линии геомагнитного поля.

Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, Москва

*E-mail: lapshin-vb1@mail.ru

**E-mail: kongt@yandex.ru

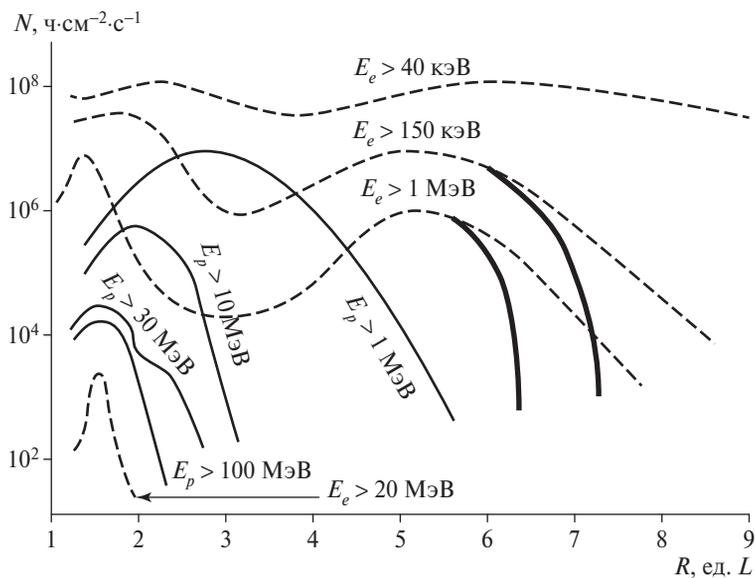


Рис. 1. Распределение плотности потоков частиц различных энергий в околоземном космическом пространстве в зависимости от высоты R , выраженной в единицах параметра Мак-Илвейна (L — оболочка) [4]. Штриховая линия — потоки электронов дневной стороны Земли, сплошная тонкая линия — потоки протонов, сплошная толстая линия — потоки электронов ночной стороны Земли. E_e — энергия электронов. E_p — энергия протонов.

3. ПРОНИКНОВЕНИЕ ЧАСТИЦ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА В АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Направление движения частиц вдоль линии геомагнитного поля позволяет им проникать в плотные слои атмосферы, где, сталкиваясь с молекулами и атомами атмосферы, частицы теряют энергию.

Область, где частицы радиационного пояса наиболее глубоко проникают в атмосферу Земли, находится в Южном полушарии, так называемая Южно-Атлантическая магнитная аномалия (ЮАА).

Именно в зоне ЮАА устойчиво регистрируются большие потоки энергичных частиц, высыпавшихся из радиационных поясов Земли, причём эти потоки на несколько порядков превосходят потоки вне зоны аномалии.

На рис. 2 и 3 показаны карты распределения плотности потоков энергичных частиц (с питч-углом 0°) по измерениям космических аппаратов (КА) “Метеор М” и КА “NOAA-19” [6]. Исходя из этих данных, можно видеть, что плотность потока частиц из радиационных поясов в области магнитной ЮАА может достигать величины 10^6 частиц/($\text{см}^2\cdot\text{с}\cdot\text{стер}$).

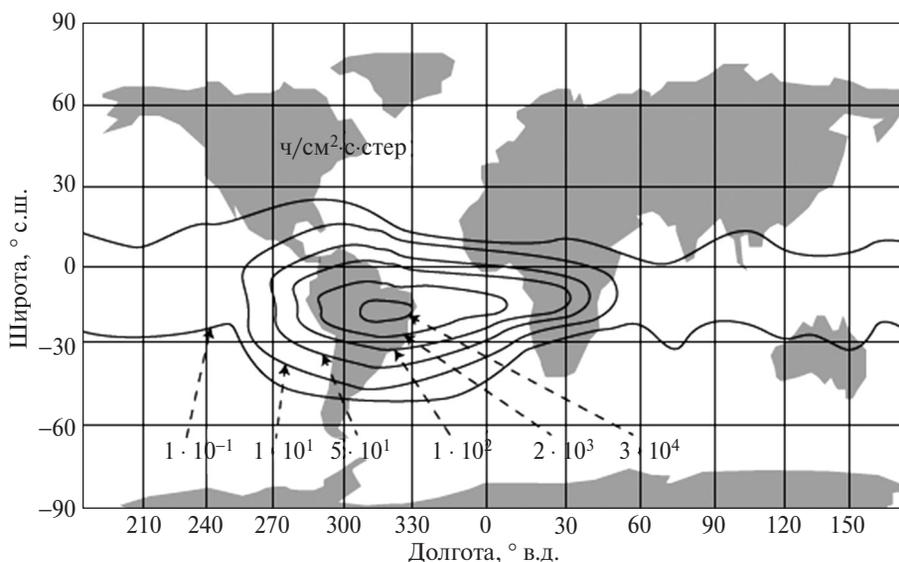


Рис. 2. Потоки протонов по данным КА “Метеор М” № 1, измеренные 24–26 января 2012 г.

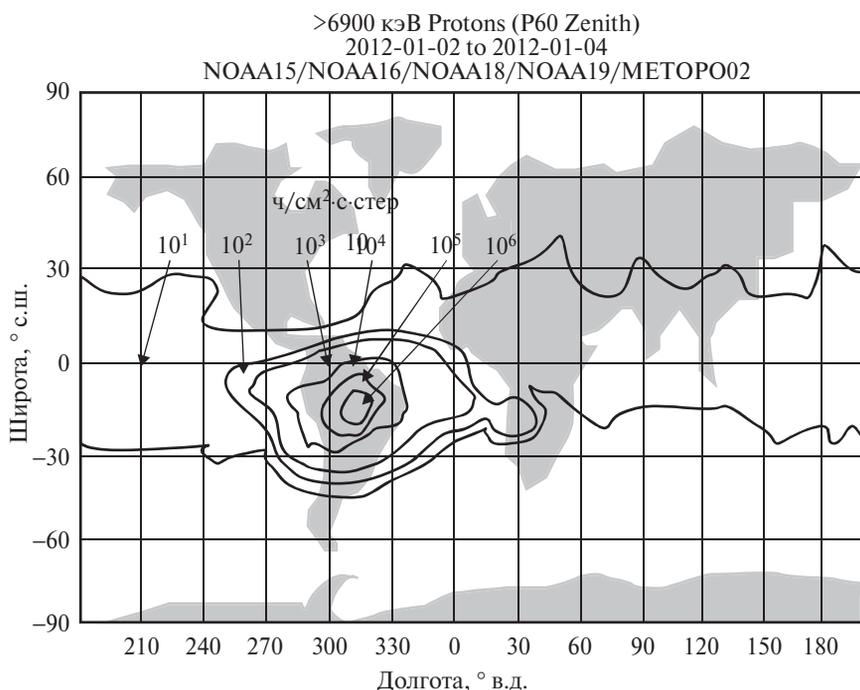


Рис. 3. Потоки протонов по данным КА “NOAA-19”, измеренные 2–4 января 2012 г. [6].

На рис. 2 показаны плотности потоков энергичных протонов, выпадающих из радиационных поясов Земли, по данным КА “Метеор М” № 1 (24–26 января 2012 г.), которые увеличиваются на порядок в районе ЮАА по сравнению с фоновыми значениями.

4. БАЛАНС АТОМАРНОГО ВОДОРОДА В ЭКЗОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Основная масса водорода сосредоточена на высотах ниже мезопаузы. В экзосфере концентрация атомарного водорода постоянна и составляет $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$ [1].

Измерения ионного состава верхней атмосферы (O^+ , He^+ , H^+ , H_2^+ , N^+) в России проводятся с 2010 г. с помощью масс-спектрометра РИМС, установленного на КА “Метеор М” № 1 и 2. Измерения, выполненные на КА “Метеор М” № 1 и 2 в районе ЮАА, подтверждают оценки, приведённые в [1], и дают значения концентраций ионов водорода порядка $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$.

Рассмотрим возможный сценарий установления равновесного состояния водорода в экзосфере. Расчёт количества водорода, находящегося в сферическом слое 700–2500 км над уровнем Земли с концентрацией $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$ [1], даёт величину порядка $10^{30} - 10^{31}$ частиц атомарного водорода.

Оценим количество протонов, выпадающих в зоне магнитной ЮАА, используя данные КА “Ме-

теор М” № 1 от 24–26 января 2012 г. (рис. 2). Интегрируем количество протонов, выпадающее из радиационных поясов в зону магнитной ЮАА в телесный угол 2π . За год количество энергичных протонов, проникающих в экзосферу, составляет величину порядка 10^{30} . Аналогичный результат, полученный по данным КА “NOAA-19” от 2–4 января 2012 г. (рис. 3), даёт величину порядка 10^{31} . Полученные оценки количества протонов совпадают по порядку величин с суммарным содержанием атомарного водорода в экзосфере.

Сопоставляя суммарное содержание атомарного водорода в экзосфере с количеством протонов (после термализации превращающихся в ионы водорода), выпадающих в зоне ЮАА в течении года, и принимая во внимание устойчивое состояние экзосферы, можно сделать следующие предположения. Диссипация атомарного водорода из атмосферы Земли компенсируется протонами космического происхождения, причём обновление атомарного водорода в экзосфере происходит примерно за год.

Оценки потока атомарного водорода из экзосферы в космическое пространство в соответствии с [7, 8] дают различные результаты, которые плохо согласуются с экспериментальными данными, полученными КА “Метеор М” и “NOAA-19”.

5. ВЫВОДЫ

Наблюдаемое постоянство общего содержания атомарного водорода в экзосфере свидетельствует

о том, что скорости пополнения водорода за счёт высыпаний из радиационных поясов и диссипации в космическое пространство совпадают по порядку величин и составляют по данным КА “Метеор М” и “NOAA-19” соответственно величины порядка 10^{30} и 10^{31} частиц H^+ в год.

Подводя итог, можно сделать следующий вывод: основным источником водорода в экзосфере являются термолизованные протоны ГКЛ и СКЛ и частично солнечного ветра. Измерения плотности потоков ионов водорода космического происхождения, по данным спутниковых наблюдений, показывают, что основной областью пополнения экзосферы водородом являются область ЮАА и частично полярные зоны. Таким образом, водород экзосферы в основном имеет космическое происхождение.

Источник финансирования. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 18–05–80023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулин П.И., Кононович Е.В., Мороз П.И. Общий курс астрономии. М.: Наука, 1977. 544 с.
2. Бьютнер Э.К. // ДАН. 1959. Т. 12. № 1. С. 53–56.
3. Скуридин Г.А., Плетнев В.Д., Шалимов В.П., Швачунов И.Н. // Земля и Вселенная. 1965. № 4. С. 12–23.
4. Гальпер А.М. // Сорос. образ. журн. 1999. № 6. С. 75–81. <http://www.kosmofizika.ru/abmn/galper/galper.htm>
5. Редерер Х. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем: Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 192 с.
6. База данных NOAA. https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/poes/data/plots_OLD/maps/png/2012/01/cylindrical/
7. Пинус Н.З., Шметер С.М. Аэрология. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1965. 645 с.
8. Мороз В.И. Физика планет. М.: Наука, 1967. 496 с.

PROTONS OF RADIATION BELTS AS A SOURCE OF HYDROGEN IN THE EARTH'S ATMOSPHERE

V. B. Lapshin, M. S. Ivanov, N. G. Kotonaeva, V. A. Burov, A. Yu. Repin

Fedorov Institute of the Applied Geophysics, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS G.S. Golitsyn September 17, 2019

Received September 24, 2019

A scenario is proposed for replenishing the Earth's exosphere with atomic hydrogen of cosmic origin. An assessment was made and the coincidence of the total atomic hydrogen content in the exosphere with the number of protons (after thermalization converted into hydrogen ions) precipitated in the SAA zone during the year according to the data of the Meteor M and NOAA-19 satellites was confirmed. The observed coincidence indicates that the rates of replenishment of hydrogen due to precipitation from radiation belts and dissipation into outer space coincide in order of magnitude. It is concluded that the exosphere hydrogen is mainly of cosmic origin and its main source is the thermalized protons of galactic cosmic rays, solar cosmic rays and partially solar wind.

Keywords: protons of radiation belt, galactic cosmic rays, solar cosmic rays, solar wind.