

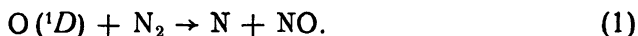
УДК 551.510 535

**О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ЗИМНЕЙ АНОМАЛИИ ОБЛАСТИ D***М. Н. Власов, В. В. Медведев*

Рассмотрен новый механизм формирования зимней аномалии области *D*, основанный на фотохимическом источнике окиси азота и учитывающий характерное для условий зимней аномалии увеличение температуры нейтрального газа. На основе численных и аналитических решений показано, что предлагаемый механизм может обеспечить наблюдаемое в условиях зимней аномалии увеличение электронной концентрации в области *D* на порядок и более.

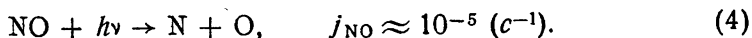
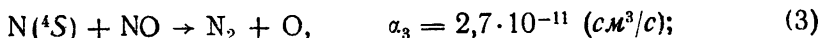
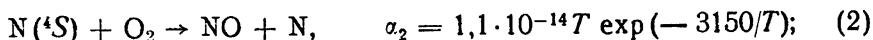
В последние годы явление зимней аномалии поглощения радиоволн в области *D* подвергалось всестороннему изучению. Особенно значительный прогресс в понимании этого сложного и очень важного явления был достигнут благодаря осуществлению в 1975—1976 гг. комплексной международной научной программы по исследованию зимней аномалии области *D*. Результаты этих исследований были опубликованы в специальном выпуске [1] и обсуждены в ряде обзоров [2, 3]. Главный вывод, полученный на основе анализа этих результатов, состоит в том, что проблема зимней аномалии области *D* — это по существу проблема окиси азота, и коль скоро мы сможем обеспечить механизм сильного (до порядка величины) возрастания концентрации окиси азота на высотах 80—90 км (область, где в основном сосредоточено явление зимней аномалии), то соответствующее изменение электронной концентрации, а следовательно, и поглощения радиоволн может быть легко получено на основе существующего ионизационно-рекомбинационного цикла [2]. Однако поиски механизма такого сильного увеличения концентрации окиси азота в области *D* до сих пор не привели к успеху. Эти поиски велись по пути привлечения динамических процессов, поскольку согласно современной теории [4] нет источников образования окиси азота ниже 100 км, и она присутствует на этих высотах только благодаря переносу из вышележащей термосферы прежде всего за счет турбулентного перемешивания. Однако даже явно завышенные оценки возможностей процессов переноса и характера их влияния на окись азота не позволяют получить сколь-либо обнадеживающие результаты в плане сильного возрастания концентрации окиси азота. Аналогичные результаты дали и попытки привлечения горизонтального переноса окиси азота.

В данной работе приведено объяснение сильного увеличения концентрации окиси азота, а следовательно, и возникновения зимней аномалии области *D* на основе нового источника образования окиси азота и атомарного азота, предложенного одним из авторов в [5]. Основой этого механизма является взаимодействие атомов $O(^1D)$ с молекулярным азотом:



При этом атомы $O(^1D)$ с энергией, необходимой для достаточно эффективного протекания реакции (1), образуются в результате фотодиссоциации молекулярного кислорода солнечным излучением с длиной волны короче 128 нм. Анализ лабораторных [6] и теоретических [7] исследований реакций (1) и соответствующей реакции с невозбужденными атомами показал, что, несмотря на запрещение по спине, эта реакция может быть весьма эффективна в случае, если преодолен энергетический барьер. Подробный анализ этого механизма образования N и NO был проведен в работе [8], где были рассчитаны концентрации N и NO на высотах 50—250 км с учетом нового источника, а также всех основных процессов, контролирующих распределение этих частиц. Результаты этих расчетов показали, что главный вклад в образование N и NO рассматриваемый источник вносит на высотах ниже 100 км, и максимум его действия приходится на высоту 80 км. При этом максимальные скорости образования N и NO в результате реакции (1) оказались близки к максимальным скоростям образования этих частиц в термосфере на высотах, больших 100 км. Разумеется, в этом рассмотрении учитывалось, что значительная часть горячих атомов $O(^1D)$ теряет свою энергию в результате упругих соударений с основными составляющими атмосферы. Благодаря введению мезосферного источника N и NO впервые удалось в [8] согласовать теорию с экспериментальными данными по окиси азота на высотах области D. Главной отличительной особенностью мезосферного источника образования окиси азота и атомарного азота является одновременное образование этих частиц в реакции (1), в то время как в термосфере атомарный азот и окись азота образуются последовательно: сначала в результате гомо-молекулярных реакций; реакций диссоциативной рекомбинации и фотодиссоциации N_2 образуется метастабильный атомарный азот, а затем его взаимодействие с молекулярным кислородом приводит к образованию окиси азота.

Анализ высотных профилей [N] и [NO], рассчитанных в [8] на основе системы уравнений, описывающей нейтральные и заряженные компоненты и включающей мезосферный источник N и NO, показал, что в области высот 80—90 км, благодаря появлению сильного источника, распределение [N] и [NO] близко к фотохимическому равновесию. Это обстоятельство позволяет довольно просто исследовать характер поведения атомарного азота и окиси азота в этих условиях. Как показывает анализ результатов численного решения [8], основными процессами, определяющими распределения [N] и [NO] на высотах 80—90 км, в этом случае являются следующие реакции (см. табл. 1 в [8]):



Соответствующие уравнения непрерывности для [N] и [NO] могут быть записаны в виде

$$\alpha_2 [N][O_2] + \alpha_3 [N][NO] = q + j_{NO} [NO]; \quad (5)$$

$$\alpha_3 [N][NO] + j_{NO} [NO] = q + \alpha_2 [N][O_2], \quad (6)$$

где $q = \alpha_1 [O(^1D)]_E [N_2]$ — скорость образования N и NO по реакции (1). Решение системы уравнений (5) и (6) имеет вид

$$[N] = q/\alpha_3 [NO]; \quad (7)$$

$$[\text{NO}] = \sqrt{\frac{q}{j_{\text{NO}}} \frac{\alpha_2}{\alpha_3}} [\text{O}_2]. \quad (8)$$

Сравнение высотных профилей $[\text{NO}]$ и $[\text{N}]$, определенных по (7) и (8), с результатами численного решения полной системы уравнений [8] показывает, что в области высот 80—90 км различие не превышает 10—20%.

С помощью решения (8) мы можем легко проследить возможное влияние изменения различных параметров верхней атмосферы на высотное распределение окиси азота. Несомненно одним из важнейших результатов комплексных исследований зимней аномалии [1] явилось обнаружение и надежное измерение увеличения температуры верхней атмосферы на высотах 80—90 км. Согласно этим измерениям [9] типичное увеличение температуры во время зимней аномалии составляет 30—40%, достигая в отдельных случаях 50—60%. Таким образом, если в обычных условиях температура нейтрального газа на высоте 85 км в зимнее время составляет 180—200 К, то во время явления зимней аномалии она может достигать 250—300 К. Оказывается, что при таком изменении температуры из всех параметров, входящих в формулу (8), наибольшее изменение претерпевает константа скорости реакции (2). На рис. 1 представлен график изменения константы скорости α_2 (в $\text{см}^3/\text{с}$) в зависимости от температуры в диапазоне значений, соответствующих наблюдаемому при зимней аномалии. Изменение α_2 в этом диапазоне температуры, как видно из рисунка, составляет более трех порядков величины.

В соответствии с решением (8) такое огромное увеличение константы скорости α_2 означает увеличение концентрации окиси азота в 30 и более раз. Таким образом, при типичном среднем для зимней аномалии увеличении температуры на 30—40% мы будем иметь достаточно типичное увеличение окиси азота (около 15 раз). Это связано с тем, что наиболее сильный рост величины α_2 имеет место, как это видно из графика, при более низких температурах. Следует отметить, что очень большое увеличение $[\text{NO}]$, в 20—30 раз, делает наши оценки по формуле (8) более приближенными, так как в этом случае нарушаются условия фотохимического равновесия.

Таким образом, наличие мезосферного источника окиси азота в сочетании с наблюдаемым увеличением температуры верхней атмосферы практически полностью обеспечивает наблюдаемое и необходимое для объяснения явления зимней аномалии увеличение концентрации окиси азота. При этом становится понятным и наблюдаемое уменьшение доли ионов-связок во время зимней аномалии, из которого прямо вытекает соответствующее уменьшение эффективного коэффициента рекомбинации в области D . В рамках этих представлений находит свое объяснение и сезонное постоянное зимнее увеличение поглощения в области D вне явления зимней аномалии. Поскольку при переходе от зимы к лету температура мезопаузы, как известно, понижается в среднем от 190 К до 160 К [CIRA-72], то это согласно формуле (8) и рис. 1 приводит к понижению $[\text{NO}]$.

Для проверки полученных выше выводов были выполнены численным методом расчеты по модели, описанной в [8]. Эта модель основана на решении системы уравнений непрерывности и движения для кислородных, азотных и водородных составляющих с учетом фотохимических процессов и процессов переноса за счет молекулярной диффузии и турбулентного перемешивания.

Результаты численных расчетов концентрации NO с учетом действия источника, обусловленного реакцией (1), и высотного распределения температуры, характерного для зимней аномалии [9], представлены на рис. 2 (кривая 1). В области высот 80—90 км концентрация

NO увеличивается в 10—20 раз по сравнению с нормальными зимними условиями, которым соответствуют результаты эксперимента [11] (кривая 2), что очень хорошо согласуется с выполненными выше расчетами по формуле (8).

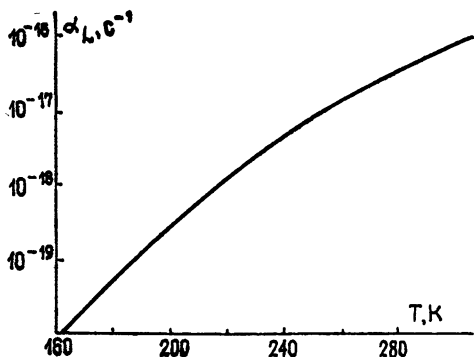


Рис. 1.

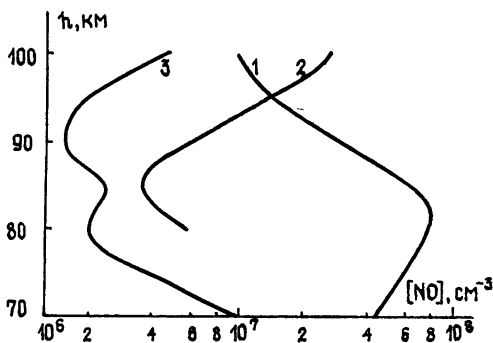


Рис. 2.

На рис. 2 представлены также результаты расчетов высотного распределения окиси азота (кривая 3) без мезосферного источника, но с учетом разогрева нейтральной атмосферы, характерного для условий зимней аномалии. Как видно, в этом случае никакого заметного увеличения концентрации окиси азота по сравнению с обычными, неаномальными условиями не происходит.

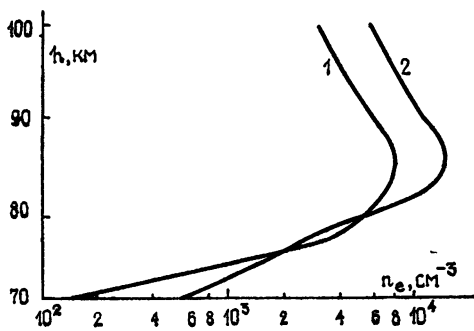


Рис. 3.

Таким образом, наличие источника образования N и NO в мезосфере позволяет объяснить сильное увеличение концентрации окиси азота в условиях зимней аномалии области D. Соответствующее увеличение электронной концентрации оказывается в полном согласии с характерным для зимней аномалии увеличением n_e . На рис. 3 представлено сравнение характерного для зимней аномалии

высотного распределения электронной концентрации, полученного в [12] на основе обобщения результатов серии ракетных измерений n_e , с высотным профилем n_e , рассчитанным с использованием полученных выше концентраций окиси азота. Как видно из сравнения кривых 1 (теория) и 2 (эксперимент), предложенная теория позволяет полностью воспроизвести все основные особенности высотного распределения электронной концентрации, соответствующей явлению зимней аномалии в области D.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Atm. Terr. Phys., 1979, 41, № 10.
2. Offerman D.— J. Atm. Terr. Phys., 1979, 41, № 10, p. 735.
3. Данилов А. Д.— Геомагнетизм и аэрономия, 1979, 19, с. 962.
4. Frederick I. E., Orcini N.— J. Atm. Terr. Phys., 1982, 44, № 6, p. 479.
5. Vlasov M. N.— Space Res., 1977, 17, p. 235.
6. Мак-Ивен М., Флеллипс Л. Химия атмосферы.— М.: Мир, 1978.
7. Tully J. C.— J. Chem. Phys., 1974, 61, p. 61.
8. Власов М. Н., Медведев В. В.— Геомагнетизм и аэрономия, 1981, 21, № 5, с. 857.

9. Becker M. et al — J. Atm. Terr. Phys., 1979, 41, № 10, p. 732.
 10. Власов М. Н., Медведев В. В. — Геомагнетизм и аэронавигация, 1981, 21, № 6, с. 1034.
 11. Tomatsu T., Iwagami N. — J. Geom. Geoelect., 1976, 28, p. 343.
 12. Beynon W. J. G., Williams E. R. — J. Atm. Terr. Phys., 1976, 38, p. 1319.

Халининградский государственный университет

Поступила в редакцию
4 июля 1983 г.

ON THE MECHANISM OF D REGION WINTER ANOMALY

M. N. Vlasov, V. V. Medvedev

New mechanism of the *D* region winter anomaly formation is proposed. The mechanism is based on the photochemical source of the nitric oxide and the neutral temperature increase characterized winter anomaly condition. The calculations carried out by numerical and analytical methods indicate that the mechanism may cause a very strong increase of the electron density corresponding to observations of *D* region winter anomaly.

Х Р О Н И К А

XV ВСЕСОЮЗНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ГАЛАКТИЧЕСКОЙ И ВНЕГАЛАКТИЧЕСКОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ

XV Всесоюзная конференция (11—13 октября 1983 г., Харьков) была организована Научным советом АН СССР по проблеме «Радиоастрономия», Отделением радиоастрономии Института радиофизики и электроники АН УССР и Харьковским государственным университетом. На конференции было заслушано 172 доклада. Широко использовалось представление докладов в виде стендов (их было 98, зачитанных докладов — 74), были заслушаны обзорные доклады по актуальным проблемам радиоастрономии и астрофизики. Это доклад И. С. Шкловского и Т. А. Лозинской «Сверхновые звезды и их остатки», Н. С. Кардашева «Проблемы галактического ядра», Ю. Н. Парийского и Р. А. Сюняева «Реликтовое излучение», В. И. Слыша «Межзвездная среда», А. Д. Кузьмина и В. С. Бескина «Пульсары», Р. Л. Сороченко, Л. И. Матвеевко и В. С. Стрельниченко «Проблемы звездообразования», Б. В. Комберга и Г. Б. Шоломицкого «Активные ядра квазаров» и др. Сделанные на высоком профессиональном уровне, эти обзорные доклады способствовали правильной оценке современного состояния радиоастрономии и вклада отечественных работ в ее развитие.

Основные достижения отечественной радиоастрономии суммировались в ряде итоговых докладов, сделанных представителями ведущих организаций (ИКИ АН СССР, САО АН СССР, ФИАН СССР, ОР ИРЭ АН УССР, НИРФИ, КраО АН СССР, ИПФ АН СССР, ГАИШ, БАО АН АрмССР и др.). Можно отметить доклады «Радиоинтерферометрические исследования на декаметровых волнах» (А. В. Мень, ОР ИРЭ АН УССР), «Исследования в области космологии с помощью радиотелескопа РАТАН-600» (Ю. Н. Парийский, ЛФ САО АН СССР), «Радиоизлучение скоплений галактик» (Р. Д. Дагкесаманский, ФИАН), «Поляризационные исследования галактического радиоизлучения» (В. А. Разин, НИРФИ), «Линейная и круговая поляризация излучения переменных внегалактических источников» (В. Н. Курильчик, Н. В. Кулакова, ГАИШ и МГУ) и др.

Ряд новых научных результатов, сообщавшихся на конференции, вызвал большой интерес участников и оживленную дискуссию. К таким можно отнести результаты поисков мелкомасштабной анизотропии реликтового фона (этот эксперимент проводился на РАТАН-600 в диапазоне сантиметровых радиоволн). Установленный верхний предел относительных флуктуаций интенсивности ($\Delta T/T \lesssim 10^{-5}$), по-видимому, требует пересмотра космологических моделей и противоречит некоторым другим наблюдениям, в которых обнаруживались пространственные флуктуации метagalacticкого фона. В дискуссии Н. С. Кардашев сообщил о начале интересного исследования распределенного космического излучения. На ИСЗ установлен высокочувствительный радиометр 8-миллиметрового диапазона, позволяющий достаточно надежно регистрировать и реликтовый фон. Этот эксперимент может решить вопрос об однородности космологического излучения.

(Продолжение см. с. 440)