

ИНТЕРКОСМОС

Некоторые результаты научных экспериментов на ракетах
„Вертикаль 1 и 2” и на спутниках „Интеркосмос 2 и 5”

Издано в

АН ГДР

Институт Электроники

Редакционная коллегия:

Ю. Рустенбах, К.-Х. Бишофф, Д. Фин.

1974

К.И.Грингауз, Н.М.Шютте

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ
НА РАКЕТАХ ВЕРТИКАЛЬ I И II

За последнее время благодаря довольно многочисленным экспериментам на ракетах и спутниках, накоплен обширный материал о высотных зависимостях электронной концентрации n_e и электронной температуры T_e , [1,2], а также концентрации основных компонент нейтрального газа $n(j)$ верхней атмосферы [1,3-5]. Построены и широко используются модели нейтральной атмосферы [6,7]. Однако, в ряде случаев средние модельные данные существенно отличаются от реальных экспериментов и это отличие не всегда удается объяснить. Кроме того, не все наблюдаемые эффекты имеют в настоящее время однозначное объяснение. Например, нет пока четкого понимания причин наблюдаемых полугодовых вариаций n_e и n_i . Существенно усложнились представления о механизмах охлаждения и нагрева электронного газа [8]. Так, тот факт, что на высотах области E ($h < 150$ км) температура электронного газа часто в 2-3 раза превышает температуру нейтрального газа, заставил Уолкера постулировать новый

источник нагрева электронов на этих высотах [9]. По его мнению таким источником являются вибрационно-возбужденные молекулы N_2 , в результате соударений с которыми нагревается электронный газ. К сожалению, основными трудностями теоретических температурных оценок являются как неопределенность абсолютных значений потоков ионизирующего излучения, так и неоднозначность энергетических распределений образующихся фотоэлектронов, поскольку имеющиеся данные о сечениях ионизации относятся, по-существу, ко всем процессам в целом приводящим к ионизации, а реальное энергетическое распределение зависит от индивидуальных процессов.

Пока недостаточно хорошо известны и эффективные коэффициенты потерь энергии, отсутствует точное описание самих процессов этих потерь. Например, Далгарно и Дегги указали на то, что электронные потери энергии при возбуждении тонкой структуры переходов уровня $O(^3P_y)$ атомного кислорода являются существенным механизмом охлаждения электронного газа [10].

Отсутствует полная ясность и в представлениях о скоростях рекомбинационных процессов, протекающих в реальных атмосферных условиях. Использование лабораторных данных о константах основных аэрономических реакций и наблюдение скорости изменения N_e во время затмений

приводило к противоречивым результатам. Весьма актуален сегодня вопрос о температурных и высотных изменениях скоростей аэрономических процессов. В связи с этим очевидно, что для получения представлений о характере и взаимосвязи процессов, протекающих в верхней атмосфере, выяснения механизмов образования ионосферы необходимы комплексные измерения различных параметров атмосферы, выполненных в одних и тех же условиях и одновременно. Особенно важно получение одновременных сведений об ионизованной и нейтральной компонентах.

С 1965 г. на советских геофизических ракетах проводятся комплексные измерения основных параметров верхней атмосферы [11]. По-существу, эти эксперименты были первыми измерениями, в результате которых на высотах 100-400 км были получены сведения как об ионизованных, так и о нейтральных компонентах верхней атмосферы при использовании дисперсионных радиоинтерферометрических и зондовых измерений и измерений поглощения солнечного излучения. До этого комплексные эксперименты подобного типа с использованием фотоэмиссионных измерений были проведены только на меньших высотах (60-120 км) Бордо и др. [12]. В 1969 г. аналогичные эксперименты с использованием спектрометров и нескольких типов зондов проводились Тимоти и др. [13] до высот $h < 270$ км.

В советских экспериментах на каждой ракете одновременно измерялись электронная концентрация n_e при помощи дисперсионного радиоинтерферометра [14], температура электронов T_e - зондовыми методами [15] и поглощение ультрафиолетового излучения Солнца - при помощи анализатора фотоэлектронов [16]. Сущность последних измерений состоит в регистрации электронов, эмиттированных из фотокатода и определении их энергетического распределения. Поскольку последнее определяется длинами волн падающего излучения, то зависимость фототока от задерживающего потенциала дает представление о спектральном составе излучения. Для этой цели в лабораторных условиях анализатор облучался монохроматическим излучением различных длин волн, а затем полетные вольтамперные характеристики сопоставлялись с лабораторными.

Измерения проводились до высоты ~ 500 км в 1965, 1966, 1970 и 1971 гг. при зенитных расстояниях Солнца $\sim 78-82^\circ$. Траектории ракет были близки к вертикальным. В итоге этих экспериментов были получены сведения не только об ионизированной, но и о нейтральной компонентах атмосферы. Совокупность полученных данных позволила определить такие параметры как эффективный коэффициент рекомбинации, приток тепла к электронному газу, эффективность нагрева электронного газа.

В результате сопоставления высотных зависимостей

$n_e(h)$ с полученными по измерению поглощения ультрафиолетового излучения зависимостями скорости ионообразования $q(h)$ вычислялись значения эффективного коэффициента рекомбинации [11,17]. При этом следует отметить, что имеющиеся в литературе оценки коэффициента рекомбинации [18,19] существенно расходятся между собой. Основная причина расхождения — трудность учета факторов, влияющих на процессы рекомбинации. Сравнение различных полученных одновременно и независимо $q(h)$ — и $n_e(h)$ — профилей в сочетании с данными о составе атмосферы позволяет определить высотную зависимость эффективного коэффициента рекомбинации. Кроме того, было показано, что наблюдавшееся в 1966 г. по сравнению с 1965 г. возрастание плотности нейтральных частиц, и особенно относительное увеличение концентрации молекулярной компоненты атмосферы [17], привело к существенному изменению высотной зависимости коэффициента рекомбинации $\beta_{\text{эфф}}$ выше 200 км. В 1966 г. в интервале 240–360 км вместо монотонного убывания с высотой наблюдалось небольшое увеличение, а затем — практически, постоянство коэффициента рекомбинации. Диффузионные процессы имели также более сложный характер.

Оценка притока тепла в электронному газу была посвящена работа Гдалевича и Шютте [20]. Используя результаты одновременных измерений n_e и T_e , а также концентрации и температуры нейтральных частиц, решалось урав-

нение баланса тепла и определялся приток тепла к электронному газу. В качестве основных механизмов охлаждения электронного газа рассматривались упругие соударения с атомарным и молекулярным кислородом, положительными ионами, молекулярным азотом, возбуждение вращательных уровней молекул N_2 , а также возбуждение тонкой структуры электронных уровней атомарного кислорода. Предполагалось, что основным источником нагрева электронного газа являлось ультрафиолетовое излучение Солнца. Такие возможные источники как электронные потоки из протосферы, электрические поля, магнитогидродинамические волны и пр. в рассмотрение не принимались. Проведенные оценки показали, что возбуждение тонкой структуры электронных уровней атомарного кислорода играет существенную роль в балансе тепла в верхней атмосфере и позволили объяснить основные особенности экспериментальных профилей $T_e(h)$ для $h > 200$ км. В настоящее время можно полагать, что полученные очень высокие значения эффективности нагрева электронного газа ($70 \div 80\%$), обусловлены завышенными значениями концентраций атомарного кислорода, для определения которого были использованы теоретические значения эффективного сечения поглощения [21]. Использование результатов экспериментальных измерений сечений поглощения σ [22,23] должно привести к существенно меньшим значениям $\bar{\alpha}$ ($50 \div 55\%$).

Запуск ракет Вертикаль I и Вертикаль II были тоже проведены утром. Зенитное расстояние Солнца было 82° и 78° , соответственно, а максимальная высота подъема $\sim 470-480$ км. На рис. I приведены полученные зависимости $n_e(h)$ [14] и $q(h)$ [16]. Обращает на себя внимание хорошее качественное согласие эти приведенных данных с результатами предыдущих аналогичных экспериментов [11,17] .

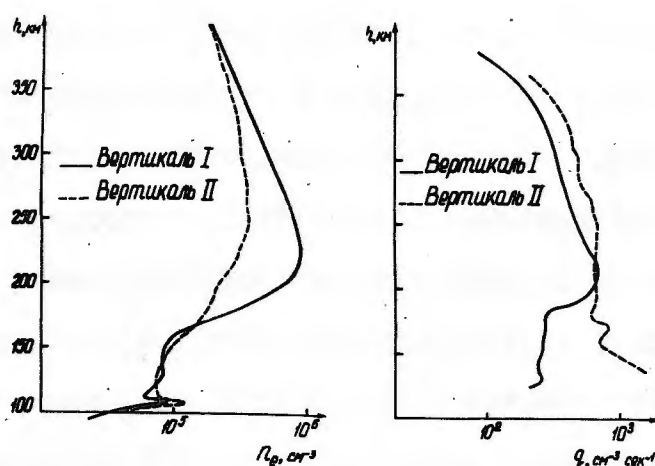


Рис. 1

На высотах 110-150 км максимум $q(h)$ лежит на ~ 20 км выше максимума $n_e(h)$, что свидетельствует об увеличении коэффициента рекомбинации на этих высотах. В области 150-400 км, наоборот, высота максимума $n_e(h)$ превышает максимум $q(h)$ на ~ 30 км.

Обращает на себя внимание и то обстоятельство, что 20.УШ.71 г. распределение электронной концентрации в области максимума слоя F-2 было менее компактным,

чем 28.XI.70 г. Значения n_e в максимуме слоя F2 во время измерений на Вертикали II были существенно меньше, по сравнению с Вертикалью I. Вариации высотных профилей n_e для данных экспериментов соответствуют классическим представлениям о сезонных изменениях n_e на средних широтах [24,25]. Однако в данном случае наблюдаемые изменения $n_e(h)$ трудно объяснить за счет вариаций нейтрального состава [16], поскольку для этих экспериментов на высотах $h > 200$ км не наблюдалось относительного увеличения концентраций молекулярных компонент в летнее время [24,25]. Следует заметить, что факт отсутствия таких сезонных изменений в структуре нейтральной атмосферы отмечался и в ряде других экспериментов [3]. С другой стороны, характер высотных изменений и абсолютные величины концентраций нейтральных частиц 20.III.71 г. были таковы, что высотный профиль $q(h)$ по-существу не имел четко выраженного максимума. На высотах 190-260 км наблюдалось практически постоянство значений $q(h)$. Отсюда напрашивается вывод, что форма слоя F2 в значительной мере обусловлена характером высотной зависимости скорости ионообразования, т.е. в конечном счете, высотным распределением и плотностью нейтрального газа. Однако наблюдаемое при этом уменьшение n_e в максимуме F2 слоя объяснить трудно. По-видимому, при рассмотрении причин сезонной аномалии необходимо принимать во внимание сово-

купность различных факторов: потоки заряженных частиц из плазмосферы и сопряженного полушария, изменения плотности и состава нейтральных частиц, сезонное поведение нейтральных ветров, влияние электрических полей и пр. [24]. При этом, вполне вероятно, что относительная роль каждого из этих факторов меняется в зависимости от конкретных условий. В дальнейшем предполагается для данных экспериментов проанализировать причины наблюдаемых вариаций n_e и нейтральных частиц.

При оценке процессов рекомбинации было использовано общепринятое представление о квадратичном законе зависимости скорости рекомбинации от электронной концентрации в нижней ионосфере (110-170 км) и о линейном законе - в верхней ионосфере (180-400 км). Первый случай характеризуется коэффициентом $\alpha_{эфф} = [\text{см}^3 \text{сек}^{-1}]$, а второй - коэффициентом $\beta_{эфф} = [\text{сек}^{-1}]$.

Для высот 130-170 км значения $\alpha_{эфф}$ были оценены, исходя из уравнения баланса ионизации вида:

$$\frac{dn_e}{dt} = q - \alpha_{эфф} n_e^2 \quad (1)$$

Величины $\frac{dn_e}{dt}$ определялись по экспериментальным значениям n_e , измеренным на одних и тех же высотах на восходящем и нисходящем участках траектории ракет. Для эксперимента 28.XI.70 г. значения $\frac{dn_e}{dt}$ были практи-

чески равны нулю во всем рассматриваемом диапазоне высот, а 20.УШ.71 г. - только для $h > 320$ км.

Результаты оценок показаны на рис.2. Эффективный коэффициент рекомбинации варьируется от $1,5 \cdot 10^{-8}$ до $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3} \text{ сек}^{-1}$. Высотная зависимость $\alpha_{\text{эфф}}(h)$ хорошо подтверждает имеющиеся теоретические оценки [26]. Следует отметить, что абсолютные значения $\alpha_{\text{эфф}}(h)$ для эксперимента 28.ХІ.70 г. на высотах $h < 160$ км оказались в несколько раз меньше, чем во время измерений 20.УШ.71 г. По всей видимости это обусловлено меньшими значениями общей концен-

трации нейтральных частиц на этих высотах [16]. Вероятно, приведенные здесь значения $\alpha_{\text{эфф}}$ несколько меньше истинных, поскольку

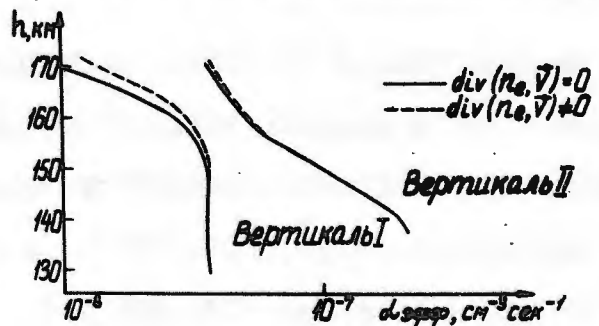


Рис. 2.

ку при оценке значений $q(h)$ не принимались во внимание такие источники ионизации, как рентгеновское и корпускулярное излучения.

Высотные зависимости эффективного коэффициента рекомбинации $\beta_{\text{эфф}}$ для $h > 200$ км приведены на рис.3. На этих высотах профиль $\beta_{\text{эфф}}$ определялся из уравнения баланса ионизации в следующем виде:

$$\frac{dn_e}{dt} = q - \beta_{эфф} n_e - \text{div}(n_e \cdot \vec{v}) \quad (2)$$

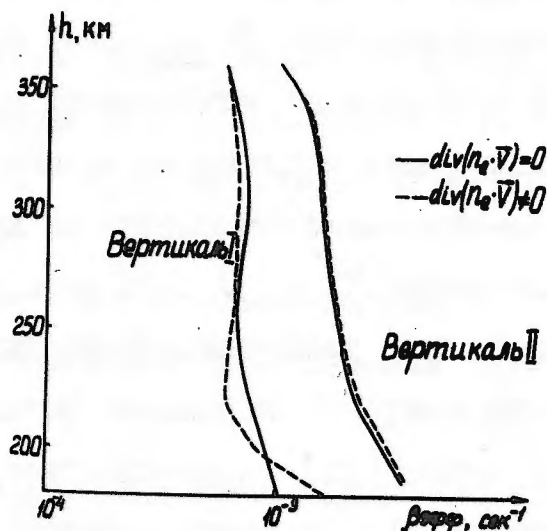


Рис. 3

Сплошная и пунктирные кривые на рис. 3 получены в предположении, что член $\text{div}(n_e \cdot \vec{v}) = 0$, а штрих-пунктирные — для случая, что $\text{div}(n_e \cdot \vec{v})$ определяется только вертикальной диффузией:

$$\text{div}(n_e \cdot \vec{v}) = \frac{2kT_g}{\bar{m}n\bar{v}} \sin^2 I \left(\frac{d^2 n_e}{dh^2} + \frac{3}{2H} \frac{dn_e}{dh} + \frac{n_e}{2H^2} \right) \quad (3)$$

где \bar{v} — частота соударений, H — шкала высот,

I — магнитное наклонение, n — концентрация нейтральных частиц, T_g и \bar{m} — температура и средняя молекулярная масса нейтрального газа.

Характерно, что высотная зависимость $\beta_{\text{эфф}}(h)$ для 28.XI.70 г. напоминает таковую для эксперимента 13.X.66 г. В работе [17] было показано, что подобный характер высотных изменений $\beta_{\text{эфф}}$ может быть обусловлен увеличением концентрации молекулярной компоненты атмосферы, в результате чего в процессах исчезновения заряженных частиц увеличивается относительный вклад реакций рекомбинации ионов N_2^+ и O_2^+ и уменьшается доля обменных реакций, т.е. увеличивается рекомбинация. Сравнение результатов измерений на ракетах Вертикаль I и II, а также данных работы [17] свидетельствует о том, что наблюдаемые профили N_e и, соответственно, высотные зависимости и абсолютные значения $\beta_{\text{эфф}}$ для $h > 200$ км нельзя объяснить только с позиций относительных изменений нейтрального состава. Для полного понимания характера рекомбинационных процессов, протекающих в верхней атмосфере на высотах $h > 200$ км необходимо принимать во внимание не только данные по составу нейтрального газа, но и абсолютные значения концентраций. Кроме того при рассмотрении баланса ионизации следует учитывать в члене движений не только вертикальную диффузию, но и нейтральные ветры, электрические поля и пр., влияние которых на распределение заряженных частиц в области максимума F2 в средних широтах, особенно в зимнее время, например, может быть весьма существенным [25].

ЛИТЕРАТУРА

1. F.S.Johnson. Proc.Nat.Acad.Sci.^{USA}, 58, 6, 2162, 1967.
2. P.M.Banks. Proc.IEEE, 57, 258, 1969.
3. А.Д.Данилов, Н.А.Шапилова. Геомагн.и аэрон., XI, 406, 1971.
4. В.В.Каткина, Г.С.Иванов-Холодный. Геом.и аэрон., XI, 919, 1971
5. H.Volland, C.Wulf-Mathies, W.Priester. J.Atм.Terr. Phys., 34, 1053, 1972.
6. L.Jacchia. Smithson.Astroph.Obs.Rep., 170, 1964.
7. U.S.Standard Atmosph.Supplements (1962;1966); CLR-1965.
8. К.И.Грингауз, Н.М.Шотте, Труды Львовской конф.по физике ионосферы, 1970 (в печати).
9. J.C.G.Walker. Planet.Space Sci., 16, 321, 1968.
10. A.Dalgarno, T.C.Degges. Planet.Space Sci., 16, 125, 1968.
11. К.И.Грингауз, Г.Л.Гдалевич, В.А.Рудаков, Н.М.Шотте. Геом.и аэрон., VIII, 204, 1968.
12. R.E.Bourdeau, A.C.Aikin, J.L.Donley. J.Geophys.Res., 71, 727, 3, 1966.
13. A.F.Timothy, J.G.Timothy, A.P.Willmore, J.H.Wager. J.Atм.Terr.Phys., 34, 969, 1972.
14. В.А.Рудаков, И.А.Кнорин. Настоящий сборник.
15. Г.Л.Гдалевич, В.Ф.Губский. Сб.Ионосферные исследования, № 20, 30, 1972.
16. Н.М.Шотте. Настоящий сборник.

17. N.M.Shutte, I.A.Knorin. Space Res., IX, 267, 1969.
18. А.Д.Данилов. Химия ионосферы. Гидрометеониздат, 1968.
19. Д.А.Ратклиф. Физика верхней атмосферы. Физматгиз, М., 1963.
20. Г.Л.Гдалевич, Н.М.Шутте. Геомагнетизм и аэронавтика, XII, № 2, 1972.
21. A.Dalgarno, D.Parkinson. J.Atm.Terr.Phys., 18, 335, 1960.
22. R.B.Cairns, J.A.Samson. Phys.Rev., 139, A 1403, 1965.
23. R.E.Huffman, J.C.Larrabee, Y.Tanaka. Phys.Rev.Let. 16, 23, 1033, 1966.
24. D.F.Strobel, M.B.McElroy. Planet.Space Sci., 18, 1181, 1970.
25. M.N.Fatkullin. J.Atm.Terr.Phys., 32, 1989, 1970.
26. Г.С.Иванов-Холодный. Геом. и аэронав., VIII, 83, 1967.