

## ГЕОХИМИЯ ПРОЦЕССА СУТОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА ВЕНЕРЫ

*К.П.Флоренский, В.П.Волков, О.В.Николаева*

Данные измерения физических параметров тропосферы Венеры, полученные аппаратами серий «Венера» и «Маринер», суммированы с учетом местного времени осуществления измерений. Обнаружена новая для тропосферы Венеры закономерность — значительные суточные вариации мощности облаков нижнего яруса. Это явление может быть обусловлено протеканием окислительно-восстановительных превращений в промежуточной геохимической зоне тропосферы.

Ранее нами была предложена модель геохимической зональности тропосферы Венеры [1]. Модель строилась главным образом на результатах прямых замеров химического состава тропосферы, а конкретное высотное положение выделенных в модели границ контролировалось совпадением их с границами скачкообразного изменения различных физических параметров тропосферы. Две геохимические зоны выделены по преобладанию в них разнотипных процессов: фотохимических — в верхней зоне (выше ~52 км), термохимических — в нижней (ниже ~36 км). В третьей, промежуточной зоне (~36–52 км) сказывается влияние процессов обоих типов, характерна весьма нестабильная обстановка и изменчивость микрокомпонентного состава атмосферы. Напомним, что в углекислой атмосфере планеты ( $97_{-4}^{+3}$  об. %  $\text{CO}_2$ ) все остальные газы и конденсаты облачного покрова играют роль микрокомпонентов. Согласно принятой

нами модели, верхний ярус облаков (~52–65 км) принадлежит верхней зоне и предположительно [2, 3] сложен серной кислотой.

Согласно модели Принна [4, 5], серная кислота формируется фотохимическим путем из COS и H<sub>2</sub>S в надоблачной атмосфере (выше ~67 км) в дневное время суток, а планетарные движения атмосферы приводят к относительно равномерному распределению капель H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> на дневной и ночной сторонах планеты до высот ~48–50 км. Так возникает верхний ярус облаков; с их сернокислотным составом согласуются новые результаты АМС «Венера-9, -10» [6–10]. Внутри этого яруса облаков возможна более тонкая стратификация [8, 11] и присутствие помимо серной кислоты небольших количеств элементарной серы [5, 12, 13]. На нижней границе облаков этого яруса (~50 км) 75%-ная H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> становится химически неустойчивой ( $T = 44^\circ \text{C}$ ,  $P = 1,2 \text{ атм}$  [14],  $x_{\text{H}_2\text{O}} \approx 10^{-3}$  [1]).

Нижний ярус облаков приурочен к промежуточной геохимической зоне и представлен, вероятно, более восстановленными соединениями [1].

В 1976 г. при сопоставлении физических характеристик облачного покрова, полученных СА АМС «Венера-4» и пролетным аппаратом «Маринер-5», В.В.Михневич и др. [15] обратили внимание на то, что хорошее согласие результатов наблюдается лишь для экспериментов, осуществлявшихся в одинаковое время венерианских суток. Эти авторы предположили, что структура облачного слоя на дневной и ночной сторонах планеты различна. В том же 1976 г. были опубликованы предварительные результаты обширного комплекса экспериментов, выполненных АМС «Венера-9, -10», впервые зондировавших околополуденную атмосферу Венеры. Отмечено, что выше ~52 км дневная атмосфера оказалась на 10–20° теплее ночной [11], а верхняя граница облачного слоя располагается днем на несколько километров выше, чем ночью [6]. Возможность различий в структуре облачного

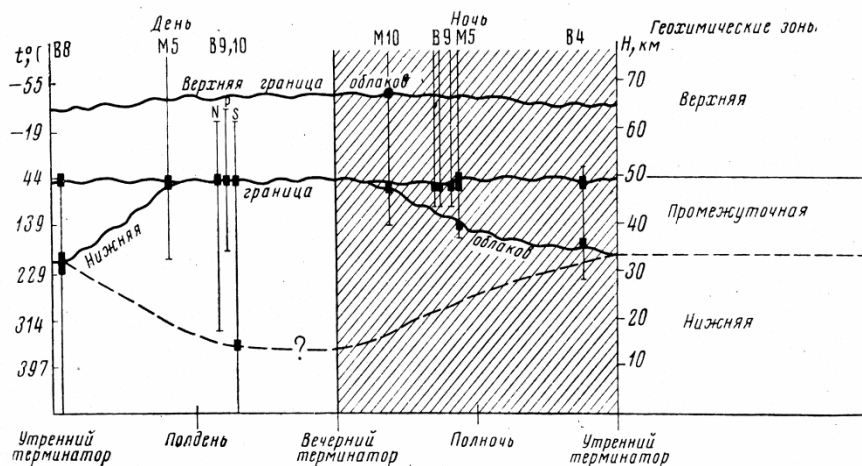
покрова днем и ночью не обсуждалась. Поэтому первоочередная задача состоит в анализе этого предположения с использованием результатов всех имеющихся на сегодня инструментальных данных. В случае его подтверждения открывается перспектива не только проверки геохимической модели новым фактическим материалом, но и ее усовершенствования.

Основные результаты экспериментов по исследованию различных физических характеристик тропосферы Венеры суммированы нами на графике в координатах местное солнечное время – высота от поверхности планеты (рисунок). Тонкие вертикальные линии отмечают высотные интервалы измерений. Прямоугольниками обозначены уровни тропосферы, на которых в определенное время венерианских суток зафиксированы скачкообразные изменения величин измеряемого параметра. Такие изменения отражают наиболее существенные вариации, происходящие в атмосферной системе газ – конденсированные вещества (облака). Сплошными линиями показаны основные границы облачного покрова.

Использованные нами фактические данные, полученные с 1967 по 1975 г. аппаратами серий «Венера» и «Маринер» и сведенные на рисунке в строгой привязке их к местному времени, удивительно согласуются между собой. Они подтверждают различие структур облачного слоя на дневной и ночной сторонах планеты, но, кроме того, позволяют обнаружить принципиально новую закономерность — значительные суточные вариации мощности облачного покрова Венеры.

Ярус облаков, существующих постоянно как в дневное, так и в ночное время, располагается на высотах от  $\sim 67-65$  км [7] до  $\sim 50 (\pm 2-3)$  км (рисунок). Ниже этого уровня на рассвете облака простираются до  $\sim 33 (\pm 2-3)$  км, но уже к полудню они рассеиваются (рисунок). По данным исследования мутности атмосферы нефелометрами [8], вскоре после полудня облака выше  $\sim 49$  км представляют собой легкую дымку с

дальностью видимости в ней  $\sim 1-4$  км; присутствие конденсированных частиц возможно и ниже [8, 11, 20], но концентрация их столь низка ( $\sim 10^{-10}$  г/см<sup>3</sup>), что дальность видимости здесь  $\sim 20$  км [8]. По земным меркам это хорошая видимость в ясный день. С наступлением венерианской ночи начинается постепенное формирование облаков ниже  $\sim 50$  км. К полуночи нижний облачный ярус простирается до  $\sim 37$  км [22], а к рассвету — до  $\sim 33$  км [14, 15], достигая максимальной мощности  $\sim 17$  км (рисунок). Напомним, что длительность венерианских солнечных суток равняется 117 земным, а год продолжается 225 земных суток.



#### Суточные вариации границ облачного покрова и геохимические зоны тропосферы Венеры для экваториальной области

Высотный ход температуры отвечает модели М.Я. Марова и О.Л.Рябова [14]. Положение верхней границы облаков вынесено по данным [7]. Тонкая стратификация в верхнем облачном слое [8, 11] не показана. В4 — измерения плотности атмосферы ионизационным плотномером СА АМС «Венера-4» [14, 15]; В8 — измерения ослабления света фотометрическим прибором СА АМС «Венера-8» [16, 17], интерпретация результатов с учетом данных наземных наблюдений [14, 18, 19]; В9 — профили радиопросвечивания с орбитальной станции «Венера-9» [11]; В9, 10 — измерения, выполненные СА АМС «Венера-9, -10»: N — нефелометрические измерения [8]; S — измерения ослабления света фотометрическим прибором [20]; P — измерения рассеянного солнечного излучения узкополосным фотометром [21]; M5 — профили радиопросвечивания с пролетного аппарата «Маринер-5» [22]; M10 — то же, «Маринер-10» [23]. Пунктиром показана предполагаемая нижняя граница зоны усиленных окислительно-восстановительных реакций.

С точки зрения представлений о геохимической зональности тропосферы Венеры [1], выявленная закономерность изменения мощности облачного покрова рассматривается нами со следующих общих позиций. Протекание химических процессов определяется прежде всего температурными условиями, варьирующими по вертикальному профилю атмосферы, но на высотах ниже ~52 км они практически одинаковы днем и ночью [11]. Фотохимические превращения обусловлены воздействием света, а его интенсивность резко различна в разное время суток. Поэтому если вариации мощности облачного покрова связаны с какими-то изменениями в химическом составе тропосферы, то искать эти изменения следует в той зоне, где происходит взаимовлияние фотохимических и химических процессов, т. е. в промежуточной геохимической зоне [1].

Из-за турбулентности атмосферы серная кислота или первичный продукт ее термического разрушения  $SO_3$  и днем и ночью проникает ниже ~50 км, в промежуточную зону. Здесь химически стабильны относительно восстановленные конденсированные вещества (соли аммония, сложные органические соединения) [1], и окисленные соединения серы восстанавливаются, вероятнее всего, до  $H_2S$ . В качестве восстановителей, претерпевающих окисление, могут выступать упомянутые конденсированные вещества и такие газы, как  $H_2$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ . На этих уровнях может быть достигнута точка росы и, вероятно, стабильна жидкая вода. Протеканию процессов восстановления окисленной серы водородом [24] и органическими соединениями [25] благоприятствует кислая реакция среды. Мы полагаем, что кислород, связанный в  $H_2SO_4$  в результате фотохимических реакций, может расходоваться в глубоких слоях атмосферы на окисление не только  $CO$  до  $CO_2$ , как это предполагал Принн [5], но и ряда других восстановленных соединений.

Усиление днем поступления окислителя фотохимического генезиса увеличивает интенсивность окислительно-восстановительных реакций. Практически полное исчезновение к полудню облаков нижнего яруса (рисунок) можно объяснить расходом слагающих его конденсатов в процессах восстановления окисленной серы. К концу дня в окислительно-восстановительные превращения в промежуточной зоне должны вовлекаться все большие количества восстановленных газов, может быть, со все более глубоких уровней тропосферы. В течение ночи поступление окислителя ослабевает настолько, что меньший расход восстановленных соединений приводит к возрастанию их относительных содержаний, и нижний ярус облаков возникает вновь.

Конкретное высотное положение нижней границы промежуточной геохимической зоны неясно. По результатам термодинамических расчетов область полного химического равновесия не простирается, вероятно, выше  $\sim 18$  км [1]. Проведившиеся до поверхности исследования светового режима дневной атмосферы выявили уровень  $\sim 15$  км как границу, выше которой возможно присутствие очень мелкого аэрозоля или истинного поглощения, а ниже ослабление света почти целиком определяется рэлеевским рассеянием [20]. Предполагаемое высотное положение нижней границы промежуточной геохимической зоны (пунктир на рисунке) показано нами ориентировочно.

В свете изложенного промежуточная зона может рассматриваться как открытая система, в которой поступление продуктов фотохимического генезиса, происходящее с различной интенсивностью в разное время суток, ответственно за протекание окислительно-восстановительных процессов и периодическое исчезновение облаков нижнего яруса. При этом важно отметить, что даже если в результате дальнейших экспериментальных исследований гипотеза о сернокислотном (вверху) и аммонийном (внизу) составе облаков будет отвергнута, то и в этом случае облака верхнего яруса, будучи продуктом

фотохимического генезиса, должны состоять из достаточно окисленных веществ, а облака нижнего яруса как продукт низкотемпературных химических превращений — из достаточно восстановленных веществ, а следовательно, протекание окислительно-восстановительных превращений в промежуточной зоне, вероятно, неизбежно. Асимметричный характер суточных вариаций мощности облаков нижнего яруса (рисунок) отражает, по-видимому, различное в разное время суток соотношение между скоростями химических реакций и динамикой атмосферы.

Итак, обобщение накопленных к настоящему времени инструментальных данных позволило обнаружить новое явление в тропосфере Венеры — значительные суточные изменения мощности ее облачного покрова. Обсуждение этой закономерности с точки зрения предложенной ранее [1] модели геохимической зональности тропосферы подтвердило и существенно дополнило эту модель. Так, теперь можно утверждать, что окислительно-восстановительная обстановка в промежуточной геохимической зоне, подробно разобранный нами при построении модели, характерна лишь для конца ночи — рассвета. Чем ближе к вечеру, тем ниже должны быть здесь относительные содержания восстановленных микрокомпонентов, таких, как CO, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, может быть, H<sub>2</sub>S. В рамках усовершенствованной модели можно прогнозировать, что в направлении от экватора к полюсам явление суточных вариаций мощности облачного покрова должно становиться все менее отчетливым.

Поступила в редакцию  
14 апреля 1977 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Флоренский К.П., Волков В.П., Николаева О.В. Геохимия, №8, 1976.
2. Sill G.T. Commun. Lunar Planet. Lab., v. 9, №171, 1972.
3. Young A.T. Icarus, v. 18, №4, 1973.

4. *Prinn R.G.* Science, v. 182, №4117, 1973.
5. *Prinn R.G.* J. Atm. Sci. v. 32, №6, 1975.
6. *Ксанфомалити Л.В., Дедова Е.В., Золотухин В.Г. и др.* Космические исслед., т. XIV, вып. 5, 1976.
7. *Ксанфомалити Л.В., Дедова Е.В., Обухова Л.Ф. и др.* Космические исслед., т. XIV, вып. 5, 1976.
8. *Маров М.Я., Бывшев Б.В., Мануйлов К.Н. и др.* Космические исслед., т. XIV, вып. 5, 1976.
9. *Гнедых В.И., Жегулев В.С., Засова Л.В. и др.* Космические исслед., т. XIV, вып. 5, 1976.
10. *Парфентьев Н.А.* Космические исслед., т. XIV, вып. 6, 1976.
11. *Яковлев О.И., Ефимов А.И., Тимофеева Т.С. и др.* Космические исслед., т. XIV, 1976.
12. *Нарке В., Nelson R.* J. Atm. Sci., v. 32, №6, 1975.
13. *Нарке В.* J. Atm. Sci., v. 33, №9, 1976.
14. *Кузьмин А.Д., Маров М.Я.* Физика планеты Венера. «Наука», М., 1974.
15. *Михневич В.В., Лившиц А.И., Гельман Б.Г.* Космические исслед., т. XIV, вып. 2, 1976.
16. *Авдуевский В.С., Маров М.Я. и др.* Докл. АН СССР, т. 210, №4, 1973.
17. *Гермогенова Т.А., Коновалов Н.В. и др.* Препринт №93 ИПМ АН СССР, 1976.
18. *Lacis A.A.* J. Atm. Sci., v. 32, №6, 1975.
19. *Pollack J.B., Young R.* J. Atm. Sci., v. 32, №6, 1975.
20. *Авдуевский В.С., Головин Ю.М., Завелевич Ф.С. и др.* Космические исслед., т. XIV, вып. 5, 1976.
21. *Мороз В.И., Парфентьев Н.А., Санько Н.Ф. и др.* Космические исслед., т. XIV, вып. 5, 1976.
22. *Fjeldbo L., Kliore A., Eshleman V.* Astronom. J., v. 76, №2, 1971.
23. *Howard H., Tyler R. et al.* Science, v. 183, №4131, 1974.
24. *Виноградов В.И., Белый В.М.* В сб.: Изотопы серы и вопросы рудообразования. «Наука», М., 1967.
25. *Николаева О. В.* Геохимия серы и углерода в процессе формирования Эльбрусского полиметаллического месторождения. Автореф. канд. дис., М., 1974.



---

THE GEOCHEMISTRY OF DIURNAL VARIATIONS OF THE VENUS CLOUD  
LAYER

*C.P.FLORENSKY, V.P.VOLKOV, O.V.NIKOLAEVA*

*V.I.Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry,  
USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR*

The consistency of measurement data on Venus troposphere obtained by both «Venera» and «Mariner» missions was found provided the consideration of these data in relation to local solar time. As a result of this method the concept of diurnal variations of lower cloud layer is proposed. This phenomenon is interpreted in terms of redox reactions within the intermediate geochemical zone of Venus troposphere.