

К ГЕОХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРОПОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ

К.П. ФЛОРЕНСКИЙ, В.П. ВОЛКОВ, О.В. НИКОЛАЕВА

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского АН СССР, Москва

На основании теоретического обобщения комплекса полученных к настоящему времени экспериментальных данных и проведенного авторами термодинамического анализа равновесий в системе O–H–C–N–S, предложена геохимическая модель тропосферы Венеры (0–65 км). Основа модели — выделение трех геохимических зон тропосферы. Верхняя (выше ~52 км) — зона характеризуется преимущественно фотохимическими процессами и, вероятно, содержит сернокислотные облака. Нижняя (0–36 км) — зона преобладания химических процессов, протекающих в гомогенной газовой среде, вероятно, в равновесных условиях. Промежуточная (~36–52 км) — зона неравновесных химических и фотохимических процессов характеризуется сложным и неустойчивым составом газов и конденсатов в облачном слое (возможно образование аммонийных солей, кристаллической серы, сложных органических соединений).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не вызывает сомнения факт принципиального отличия кислородно-азотной атмосферы Земли от углекислой атмосферы Венеры при исключительном сходстве физических параметров этих планет (размеры, масса и др.). Поэтому детальное изучение состава атмосферы Венеры и протекающих там геохимических процессов важно для понимания условий формирования и особенностей древнейшей, абиогенной атмосферы земли. Именно так, с позиций сравнительной планетологии, ставил вопрос А.П.Виноградов — основоположник советской космохимии и инициатор химического изучения Венеры, который в течение многих лет направлял работы авторов статьи. Невозможно построить достоверную модель эволюции земной атмосферы без рассмотрения составов атмосфер других планет земной группы как отдельных звеньев этой эволюции.

В последнее десятилетие исследования с помощью автоматических межпланетных станций (АМС) привели к получению обширной информации по физике и химии атмосферы

Венеры. Эта информация требует дальнейшего осмысления. Данные прямых (АМС «Венера-4, 5, 6, 8») и косвенных (АМС «Маринер-5, 10», наземные наблюдения) определений химического состава нижней атмосферы получены с помощью различных методов и относятся к различным уровням атмосферы.

Результаты этих измерений обнаруживают существенный разброс, поэтому назрела необходимость построить внутренне непротиворечивую схему интерпретации химического состава атмосферы (в качестве первого шага — тропосферы) с геохимических позиций. Такая модель позволила бы провести увязку накопленной к настоящему времени информации о химическом составе и физических свойствах тропосферы Венеры.

Тропосфера планеты — это самый нижний слой внешней планетной оболочки — атмосферы, который характеризуется, с одной стороны, турбулентностью, а с другой — возможным равновесием с твердой поверхностью планеты (0 км). Верхняя граница тропосферы — уровень, на котором происходит резкое изменение скорости падения температуры с высотой. На Венере этот уровень совпадает с наблюдаемой с Земли верхней границей облаков (~65 км) [1]. Облачный слой планет характеризуется протеканием в нем изменчивых, нестационарных процессов; само существование облаков связано с их непрерывным возрождением в условиях атмосферной циркуляции. Выше тропосферы начинают проявляться свойства атмосферы как открытой газовой системы, подвергающейся влиянию интенсивного излучения; здесь преобладают фотохимические процессы.

КРАТКИЙ ОБЗОР ДАННЫХ О ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ ТРОПОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ

Накопленная к настоящему времени информация о химическом составе тропосферы Венеры суммирована в двух крупных обзорных работах: монографии А.Д.Кузьмина и М.Я.Марова «Физика планеты Венера» [1] и специальном выпуске журнала «Journal of the Atmospheric Sciences» (v. 32, №6, 1975), посвященном итогам конференции по атмосфере Венеры. Наш краткий обзор составлен с учетом материалов, суммированных в этих работах [1–3]. В дальнейшем изложении мы также будем ссылаться преимущественно на эти сводки. В обзоре основной акцент сделан на приуроченность измеряемой величины к определенному уровню тропосферы.

Для тропосферы Венеры в целом уже результаты первых прямых замеров АМС «Венера-4» [4], а впоследствии и «Венера-5, 6», позволили надежно установить содержание главного компонента тропосферы CO_2 (97^{+3}_{-4} об.%) и верхний предел концентрации N_2 (не более 1–2 об.%). Вертикальное распределение CO_2 и N_2 в тропосфере может считаться достаточно равномерным, чему не противоречат результаты прямых измерений.

Физическими методами показана также вероятность равномерного вертикального распределения CO ($\sim 5 \cdot 10^{-3}$ об.%), не подтвержденная пока результатами прямых замеров. Все эти предположения соответствуют представлению о конвективном выравнивании состава газов, наблюдаемому и в тропосфере Земли.

На различных уровнях тропосферы Венеры измерялись также концентрации H_2O , NH_3 , O_2 . Результаты этих измерений, представленные в табл. 1, сильно отличаются друг от друга и вызывают разноречивые толкования. Для других второстепенных компонентов тропосферы Венеры установлены лишь верхние пределы их содержаний, соответствующие нижнему пределу чувствительности применяемых методов, причем эти величины, полученные оптическими методами, относятся лишь к видимой с Земли границе облачного слоя.

Соотношение между главными составляющими тропосферы определяет средний молекулярный вес газа $\mu \approx 43,4_{-0,3}^{+0,6}$, принятый в модели T–P–h атмосферы, предложенной М.Я.Маровым и О.Л.Рябовым [1]. По Р.Ф.Мюллеру [6] область тропосферы принадлежит к зонам термохимических реакций (внизу) и «замороженных», «закаленных» термохимических равновесий (на уровне облачного слоя), что позволило автору ограничиться рассмотрением равновесий газ – порода на поверхности. Теоретическая оценка состава главных и второстепенных газов, находящихся в химическом равновесии с предполагаемыми породами поверхности, дана также Дж.С.Льюисом [7]. Состав вероятных соединений серы, углерода, кислорода и водорода, участвующих в фотохимических превращениях на высотах ~ 45 – 100 км оценен Р.Г.Принном [8]. Таким образом, единой геохимической модели тропосферы, в рамках которой было бы увязано вертикальное распределение как ее основных, так и малых компонентов, в настоящее время не существует. В нашей работе предпринята попытка восполнить этот пробел.

Построение достаточно полной геохимической модели тропосферы возможно лишь путем учета взаимодействия химических и физических процессов, управляющих распределением компонентов тропосферы. Статическое распределение компонентов, обусловленное химическими процессами в меняющемся T–P-профиле тропосферы, можно оценить количественно методом термодинамического анализа (если достигается состояние равновесия). Картину реального динамического распределения компонентов можно получить путем сопоставления скоростей физических процессов, происходящих в тропосфере, прежде всего скоростей конвективного перемешивания, со скоростями протекающих здесь химических реакций. Для построения подобной полной модели имеющихся к настоящему времени данных недостаточно.

В работе проводится количественный термодинамический расчет распределения соединений по вертикальному профилю тропосферы в рамках пятикомпонентной системы O–H–C–N–S, а влияние возможных физических процессов учитывается лишь качественно. Таким образом, задача создания полной геохимической модели решается лишь в первом, но необходимом приближении.

Практически сопоставление расчетных и инструментальных данных, полученных для тех или иных уровней тропосферы, позволяет установить границы, разделяющие области тропосферы, где состояние химического равновесия маловероятно, от областей, где оно возможно. Соответствие таких границ границам, установленным в принятых физических моделях тропосферы, служит критерием адекватности получаемых выводов.

Таблица 1

**Результаты определения второстепенных компонентов
газового состава тропосферы Венеры**

| Высота над поверхностью, км | Содержание газа, об. % | | | Способ получения данных | № или условное обозначение на рис. 1, 2, 4 |
|--------------------------------|--|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---|
| | H ₂ O | NH ₃ | O ₂ | | |
| ~65* | 10 ⁻² –10 ⁻³ *** | <10 ⁻⁵ *** | <5·10 ⁻⁴ *** | Спектроскопия | 3 (H ₂ O) 4 (NH ₃) ← (COS, H ₂ S, SO ₂ , CH ₄) |
| ~54 | ~1 | — | — | Венера-5 | В-5 |
| ~53 | >10 ^{-1,2} | — | ≥0,4 | Венера-4 | В-4 (H ₂ O) |
| ~46 | $\left\{ \begin{array}{l} \leq 10^{-0,1} \\ — \end{array} \right.$ | — | — | Венера-4, 6 | В-4, 6 (H ₂ O) |
| | | | | Венера-8 | В-8 (NH ₃) |
| ~38 | >10 ^{-1,2} | — | ~0,1 | Венера-5 | В-5 (H ₂ O) |
| | >10 ^{-1,2} | — | 0,1–0,2 | Венера-6 | В-6 (H ₂ O) |
| ~30 | — | 10 ⁻¹ –10 ⁻² | — | Венера-8 | — |
| ~35–40** | 10 ⁻¹ –10 ⁻² | — | — | Венера-9 | 2 |
| Нижняя тропосфера | ≤10 ⁻¹ | — | — | Радиоастрономия | 1 |
| Нижняя тропосфера | — | ≤10 ⁻³ | — | Радиоастрономия и радиолокация | — |

* Кроме H₂O, NH₃, O₂ определены (об.%): CH₄ < 10⁻⁴, COS и H₂S*** < 10⁻⁵, SO₂*** < 10⁻⁶.

** По данным [5].

** По данным [3].

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ O–H–C–N–S

Основные допущения: 1) высотная привязка T–P–уровней тропосферы следует модели атмосферы М.Я.Марова и О.Л.Рябова [1]; 2) все газы рассматриваются как идеальные, так как в этих T–P–условиях их коэффициенты летучести практически равны единице [9]. Тогда относительное объемное содержание каждого газа¹ равняется мольной доле этого газа, обозначаемой x_i . Обратим внимание на то, что при термодинамическом расчете предполагается постоянство валового элементного состава тропосферы во всем ее объеме.

Для всех уровней тропосферы Венеры ниже ~52 км (~300° К, ~0,9 атм)² рассчитывается равновесный состав пятикомпонентной (O–H–C–N–S) газовой смеси.

Все рассчитанные равновесия сведены в табл. 2. Уравнения (1)–(9) характеризуют основные фазовые соотношения в системе O–H–C–N; уравнения (10)–(16) моделируют добавление в эту систему соединений серы; уравнения (17)–(20) описывают равновесия с участием некоторых соединений хлора. Проанализируем последовательно все эти равновесия.

Экспериментальные данные по микрокомпонентному составу тропосферы Венеры ниже видимой границы облаков ограничены определениями H₂O и NH₃, поэтому в первую очередь рассмотрим равновесия в системе O–H–C–N. Для решения уравнений принято равномерное распределение по вертикали CO₂ ($x_{CO_2} = 0,97$, $\lg x_{CO_2} = 0,0$) и N₂ ($x_{N_2} = 2 \cdot 10^{-2}$, $\lg x_{N_2} = -1,7$), а также CO ($x_{CO} = 5 \cdot 10^{-5}$, $\lg x_{CO} = -4,3$). Подчеркнем, что при $\sum x_i = 1$ (100 об.%) и $x_{CO_2} + x_{N_2} = 0,99$ (99 об.%) все дальнейшие рассуждения будут касаться лишь соединений с $x_i \leq 10^{-2}$ (≤ 1 об.%).

Результаты расчета уравнений (1)–(4) представлены на рис. 1 в виде номограммы равновесных содержаний H₂O, NH₃ и CH₄ для различных температурных уровней. В состоянии равновесия каждой конкретной величине концентрации H₂ на заданном T–P–уровне отвечают строго определенные значения концентраций H₂O, NH₃, CH₄, как и других газов, входящих в уравнения (1)–(4). Если эти равновесные концентрации совпадают с реально замеренными, то на данном уровне тропосферы Венеры возможно равновесное состояние газов.

¹ В американской литературе «mixing ratio».

² Расчеты для температур ниже 298° К не проводились как из-за отсутствия надежных термодинамических констант, так и из-за крайне малой вероятности достижения химического равновесия при этих температурах.

Таблица 2

**Величины констант равновесий ($\lg K^\circ_p$) в системе O–H–C–N–S–Cl при температурах 300–770° К
для оценки параметров состава тропосферы Венеры**

| № п.п. | Уравнения равновесий | h, км | | | | | | | |
|-----------|--|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | ~52 | ~44 | ~36 | ~30 | ~18 | 0 | 0 | 0 |
| | | $\lg K^\circ_p$ при T° К | | | | | | | |
| | | 300 | 375 | 450 | 500 | 605 | 710 | 745 | 770 |
| 1. | $0,5N_2 + 1,5H_2 = NH_3$ ¹⁾ | +2,8 | +1,2 | +0,1 | -0,5 | -1,4 | -2,1 | -2,3 | -2,4 |
| 2. | $H_2O = H_2 + 0,5O_2$ | -39,8 | -31,3 | -25,7 | -22,9 | -18,5 | -15,3 | -14,5 | -13,9 |
| 3. | $CO_2 = CO + 0,5O_2$ | -44,8 | -34,9 | -28,3 | -25,0 | -19,9 | -16,3 | -15,3 | -14,7 |
| 4. | $CO_2 + 2H_2 = CH_4 + O_2$ | -59,8 | -48,8 | -41,5 | -37,8 | -32,2 | -28,2 | -27,2 | -26,4 |
| 5. | $C_{(ТВ)} + 2H_2 = CH_4$ | +8,8 | +6,2 | +4,3 | +3,4 | +1,9 | +0,8 | +0,6 | +0,4 |
| 6. | $N_2 + O_2 = 2NO$ | -30,1 | -23,8 | -19,6 | -17,6 | -14,3 | -12,0 | -11,3 | -10,9 |
| 7. | $0,5N_2 + O_2 = NO_2$ | -8,9 | -7,9 | -7,1 | -6,7 | -6,1 | -5,7 | -5,6 | -5,5 |
| 8. | $CO_2 + 0,5N_2 + 0,5H_2 = HCN$ ²⁾ + O_2 | -89,6 | -71,3 | -59,1 | -53,1 | -43,6 | -36,9 | -35,1 | -33,9 |
| 9. | CH_2N_2 ²⁾ + $O_2 = N_2 + H_2 + CO_2$ | +106,7 | +86,4 | +72,8 | +66,0 | +55,5 | +48,0 | +46,0 | +44,7 |
| 10. | $CO_2 + H_2S = COS$ ³⁾ + H_2O | -5,3 | -4,2 | -3,5 | -3,1 | -2,6 | -2,2 | -2,1 | -2,0 |
| 11. | $H_2O + SO_2 = H_2S + 1,5O_2$ | -86,2 | -68,1 | -56,1 | -50,1 | -40,7 | -34,1 | -32,3 | -31,1 |
| 12. | CS_2 ²⁾ + $O_2 = S_2 + CO_2$ | +66,2 | +52,9 | +44,1 | +39,6 | +32,7 | +27,8 | +26,5 | +25,6 |
| 13. | $2H_2S + CO_2 = CS_2$ ²⁾ + $2H_2O$ | -12,1 | -9,8 | -8,2 | -7,4 | -6,2 | -5,3 | -5,1 | -4,9 |
| 14. | $SO_2 + 0,5O_2 = SO_3$ | +12,3 | +8,9 | +6,6 | +5,4 | +3,6 | +2,4 | +2,0 | +1,8 |
| 15. | $H_2 + S^\circ_{(ТВ)}$ ⁴⁾ = H_2S | -5,8 | -5,1 | — | — | — | — | — | — |
| 16. | COS ³⁾ + $NH_3 = HNCS$ ⁵⁾ + H_2O | -11,7 | -9,2 | -7,5 | -6,7 | -5,4 | -4,5 | -4,3 | -4,1 |

| | | | | | | | | | |
|-----|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|
| 17. | $2\text{HCl} = \text{Cl}_2 + \text{H}_2$ | -33,2 | -26,7 | -22,4 | -20,3 | -16,9 | -14,5 | -13,8 | -13,4 |
| 18. | $\text{CHCl}_3^{2)} + \text{H}_2\text{O} = 3\text{HCl} + \text{CO}$ | +22,2 | +20,6 | +19,6 | +19,0 | +18,2 | +17,6 | +17,4 | +17,3 |
| 19. | $\text{CCl}_4^{6)} + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{HCl} + \text{CO}_2$ | +45,0 | +38,8 | +34,7 | +32,6 | +29,4 | +27,1 | +26,5 | +26,1 |
| | T° K | 300 | 325 | 358 | 400 | 450 | T° K _{разлож.} | | |
| 20. | $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3 = \text{NH}_4\text{HCO}_3_{(ТВ)}^{7)}$ | +5,0 | +2,7 | — | — | — | 309–333 | | |
| 21. | $\text{SO}_2 + 2\text{NH}_3 + 0,5\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} =$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4_{(ТВ)}$ | +58,9 | +51,5 | +43,4 | +35,0 | +27,1 | 623 | | |
| 22. | $\text{NH}_3 + \text{HCl} = \text{NH}_4\text{Cl}_{(ТВ)}^{8)}$ | +15,8 | +13,4 | +10,8 | +8,2 | +5,7 | 611 | | |

Примечание.

- 1) Для всех веществ, кроме оговоренных ниже, исходные термодинамические константы заимствованы из [10].
- 2) Термодинамические константы из [11]; CH_2N_2 — диазометан; CHCl_3 — трихлорметан.
- 3) Термодинамические константы COS заимствованы из [12], причем величины $\Delta H_{f,288}^\circ$ и S_{298}° совпадают с таковыми по [13]; при расчете с термодинамическими константами $\text{COS}_{(Г)}$ из [11] величины $\lg K_p^\circ$ уравнения (10) для тех же температур равняются соответственно: -6,1; -4,8; -3,6; -3,0; -2,5; -2,4; -2,3; а величины $\lg K_p^\circ$ уравнения (16): -10,9; -8,6; -7,0; -6,2; -5,0; -4,2; -3,9; -3,8.
- 4) $S_{(ТВ)}^\circ = S_{(ромб.)}^\circ$; фазовый переход $S_{(ромб.)}^\circ \rightarrow S_{(монокл.)}^\circ$ (368°K) не учитывался, так как $\Delta H_{ф.п.}^\circ = 0,096$ ккал/моль [10]. T°K фазового перехода $S_{(ТВ)}^\circ \rightarrow S_{(ж)}^\circ = 388^\circ\text{K}$.
- 5) Термодинамические константы $\text{HNCS}_{(Г)}$ заимствованы из [13]; принято $\Delta C_p^\circ(T) = C_p^\circ_{298}$.
- 6) Коэффициенты уравнения $C_p^\circ(T)$ из [11].
- 7) $\Delta H_{f,288}^\circ$ и S_{298}° для $\text{NH}_4\text{NC}_3_{(ТВ)}$ из [14]; $C_p^\circ(T) = 0$.
- 8) Коэффициенты уравнения $C_p^\circ(T)$ из [15].

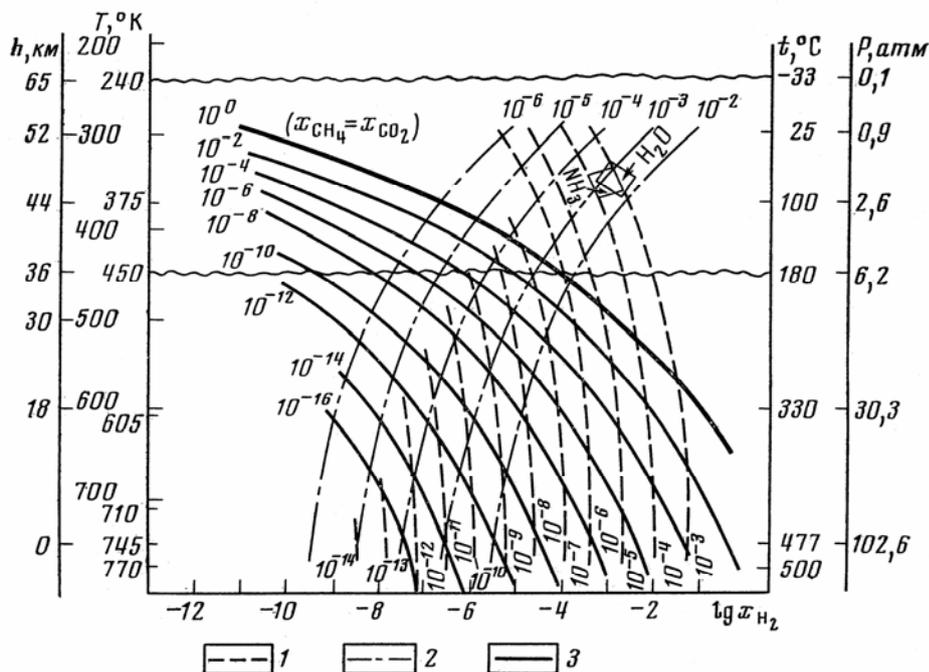


Рис. 1. Номограмма равновесных концентраций H_2O , NH_3 , CH_4 (уравнения (1) — (4) табл. 2), построенная для тропосферы Венеры в координатах $T - \lg x_{\text{H}_2}$

Принято $x_{\text{CO}_2} = 0,97$ ($\lg x_{\text{CO}_2} = 0,0$), $x_{\text{N}_2} = 0,02$ ($\lg x_{\text{N}_2} = -1,7$), $x_{\text{CO}} = 5 \cdot 10^{-5}$ ($\lg x_{\text{CO}} = -4,3$). Прямоугольниками обозначены результаты прямых определений NH_3 и H_2O (табл. 1). 1 — x_{NH_3} по уравнению (1); 2 — $x_{\text{H}_2\text{O}}$ по уравнениям (2), (3); 3 — x_{CH_4} по уравнениям (4), (3)

На уровне ~ 46 км величины $x_{\text{NH}_3} \approx 10^{-3} - 10^{-4}$ и $x_{\text{H}_2\text{O}} \approx 10^{-2,2} - 10^{-3,2}$ (табл. 1) совпадают с величинами равновесных концентраций H_2O и NH_3 при $x_{\text{H}_2} \approx 10^{-3}$ (рис. 1), но в условиях равновесия такое содержание водорода на этом уровне соответствует преобладанию в составе газовой смеси CH_4 над CO_2 на 6–8 порядков. Однако при построении номограммы рис. 1 было принято, что $x_{\text{CO}} = 5 \cdot 10^{-5}$, $x_{\text{N}_2} = 2 \cdot 10^{-2}$. Проверим, не может ли отказ от этих допущений привести к тому, что x_{N_2} будет отвечать как условию $x_{\text{CO}} \gg x_{\text{CH}_4}$, так и замерам содержаний H_2O и NH_3 .

Для выполнения этих условий необходимо либо уменьшить x_{H_2} в равновесии $\text{H}_2 - \text{NH}_3$ (уравнение (1)), что достигается при увеличении x_{N_2} , либо увеличить x_{H_2} в равновесии $\text{CO}_2 - \text{CO} - \text{CH}_4$ (комбинация уравнений (2)–(4)), что достигается при увеличении $x_{\text{H}_2\text{O}}$ или уменьшении x_{CO} . При расчете уравнения (1) используется верхний предел содержания азота (табл. 1), поэтому допущение $x_{\text{N}_2} > 2 \cdot 10^{-2}$ не обосновано. Чтобы избежать наиболее сомнительного допущения (значение x_{CO}), воспользуемся величинами отношения $x_{\text{CO}_2}/x_{\text{CH}_4}$. Концентрации воды будем варьировать. Таким путем построена номограмма рис. 2, из которой ясно видно, что в условиях равновесия при любых разумных концентрациях воды данные прямых

замеров NH_3 на уровне ~ 46 км отвечают только соотношению $\text{CH}_4 \gg \text{CO}_2$ (незаштрихованная область на рис. 2).

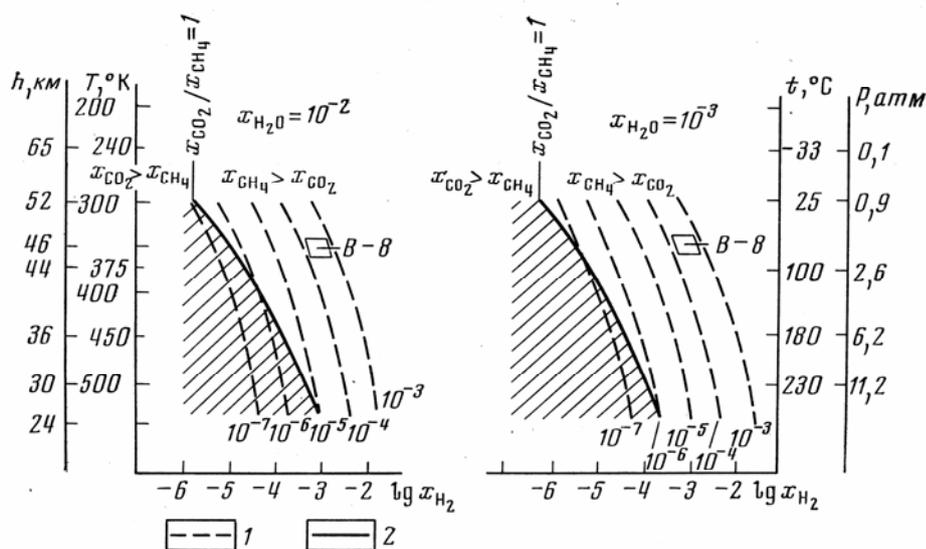


Рис. 2. Номограмма равновесных концентраций NH_3 и отношений концентраций CO_2/CH_4 (уравнения (1)–(4) табл. 2), построенная для среднетемпературной области тропосферы Венеры в координатах $T - \lg x_{\text{NH}_3}$ при $x_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-3}, 10^{-2}$. Прямоугольником обозначены результаты прямых определений NH_3 (табл. 1); штриховкой показана область тропосферы, где в условиях равновесия углекислый газ преобладает над метаном. 1 — x_{NH_3} по уравнению (1); 2 — $x_{\text{CO}_2}/x_{\text{CH}_4}$ — по уравнениям (2), (3), (4)

В настоящее время явное преобладание углекислого газа в тропосфере Венеры признается бесспорным фактом. Поэтому в той области тропосферы, где по условию равновесия среди газов должен преобладать метан (рис. 1, 2), состав газов является неравновесным. Возможно ли достижение состояния равновесия на более низких уровнях тропосферы, и если да, то на каких?

Вероятный T – P -уровень равновесного сосуществования газов в системе O – H – C – N можно зафиксировать по пересечению кривой реально измеренных содержаний H_2O с кривой возможных концентраций CH_4 (рис. 1). По экспериментальным данным (табл. 1), содержание H_2O , приблизительно равное $10^{-3,5}$, можно оценить как равномерное ниже ~ 30 – 35 км. Содержание метана не может быть выше 1 об.% ($x_{\text{CH}_4} = 10^{-2}$). При таких концентрациях воды и метана верхняя граница равновесного сосуществования газов отвечает уровню ~ 36 км, $\sim 450^\circ \text{K}$. Изменение x_{CH_4} до 10^{-4} и $x_{\text{H}_2\text{O}}$ до 10^{-4} сдвигает эту границу вниз всего на ~ 2 км.

Из-за отсутствия прямых замеров содержания какой-либо формы серы в тропосфере Венеры уравнения (10)–(16) табл. 2 решаются таким образом, чтобы получить величины отношений содержаний различных соединений серы (x_i/x_j). Результаты расчетов представлены на рис. 3 (содержания CO_2 и CO — те же, что на

рис. 1). График рис. 3, построенный в координатах $T - \lg x_i/x_j$, позволяет оценить относительное преобладание форм i или j . При $\lg x_i/x_j < 1$ (левая часть рисунка) преобладает форма j , при $\lg x_i/x_j > 1$ (правая часть рисунка) — форма i . Для отношения $x_{H_2S}^2/x_{CS_2}$ преобладающая форма определяется путем подстановки в уравнение (13) различных частных значений. Величины отношений SO_3/SO_2 и $HNCS/COS$ крайне низки и поэтому на графике рис. 3 не показаны.

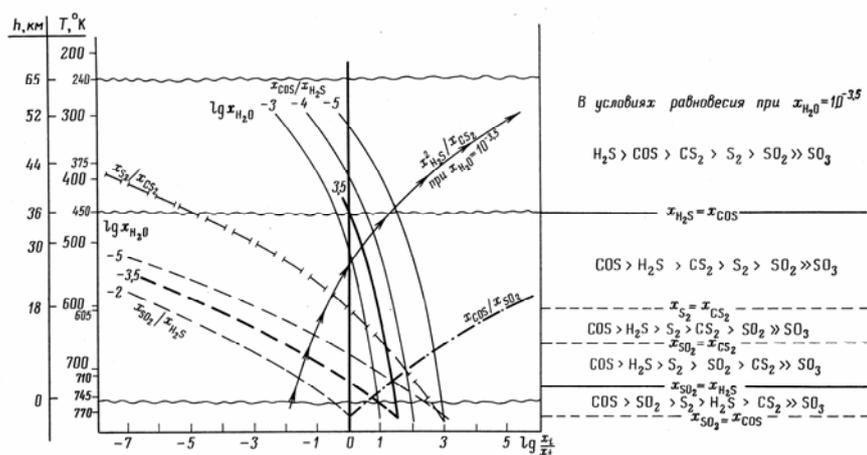


Рис. 3. Номограмма отношений равновесных количеств газов, содержащих серу (уравнения (10)–(13), (2), (3) табл. 2), построенная для тропосферы Венеры в координатах $T - \lg x_i/x_j$ для различных содержаний воды. Принято $x_{CO_2} = 0,97$, $x_{CO} = 5 \cdot 10^{-4}$. Величины x_{SO_3}/x_{SO_2} (уравнение (14)) и x_{HNCS}/x_{COS} (уравнение (16)) $\ll 10^{-7}$. Справа от графика показаны ряды относительного преобладания различных соединений серы на разных уровнях тропосферы Венеры при $x_{H_2O} = 10^{-3,5}$ (на графике выделены жирными линиями)

Полученные результаты позволяют построить ряды относительного преобладания различных газообразных соединений серы на определенных уровнях тропосферы (справа от графика рис. 3). В условиях равновесия при $x_{H_2O} = 10^{-3,5}$, оцененной по экспериментальным данным, серо-окись углерода преобладает среди газов серы в области тропосферы от поверхности³ до высоты ~ 36 км; выше доминирующей равновесной формой должен быть сероводород. Таким образом, уровень ~ 36 км, выделенный ранее (рис. 1) как граница, ниже которой равновесный состав атмосферы — углекислый, вновь выявляется на рис. 3 как граница смены главных преобладающих форм серы.

Кроме того, и что особенно важно, уровень ~ 36 км, четко фиксируемый по изменению равновесного химического состава преобладающих форм углерода и серы, совпадает с физической границей — предполагаемой нижней границей облачного слоя [1, 2, 16 (рис. 3)], на которой фазовое состояние компонентов тропосферы меняется от гомогенного (газ) до гетерогенного (газ + конденсат). Напомним еще раз, что облачный слой — самая нестационарная область тропосферы.

³ На уровне $\sim 770^\circ$ К преобладающие соединения серы — COS и SO_2 .

Предположив, что ниже ~ 36 км состав газов действительно отвечает равновесному, $x_{H_2O} = 10^{-3,5}$, а содержания CO_2 и CO — те же, что на рис. 1, 3, для области тропосферы 0–36 км можно построить профили вертикального распределения равновесных концентраций газов в системе $O-H-C-N-S$ (рис. 4). Таким способом по уравнениям табл. 2 рассчитаны кривые содержаний H_2 , CH_4 (сплошная линия), NH_3 (ниже ~ 36 км).

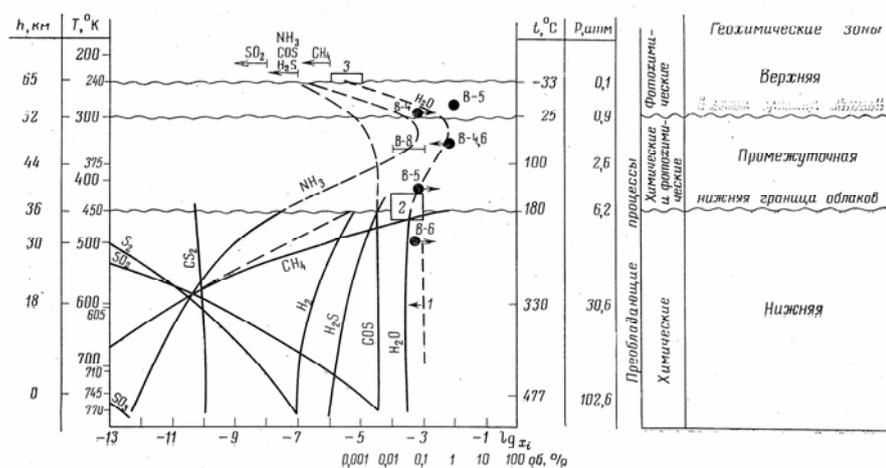


Рис. 4. Предполагаемое вертикальное распределение малых компонентов в тропосфере Венеры, оцененное по экспериментальным (табл. 1) и расчетным (табл. 2) данным. При расчетах принято равномерное распределение CO_2 ($x_{CO_2} = 0,97$), N_2 ($x_{N_2} = 0,02$) и CO ($x_{CO} = 5 \cdot 10^{-9}$). Справа от графика указаны процессы, преобладающие в трех основных геохимических зонах тропосферы.

Однако для аналогичной оценки распределения газообразных соединений серы сделанных допущений недостаточно; необходимо также знать величину содержания какой-либо фазы серы либо на каждом Т–Р-уровне, либо приняв ее постоянной для всех уровней ниже ~ 36 км. Ранее мы предположили, что в этой области тропосферы равномерно распределяются CO_2 , N_2 , H_2O и CO . По аналогии можно допустить и равномерное распределение здесь преобладающей формы серы — COS .

Для оценки величины содержания COS в нижней тропосфере использование спектроскопических данных ($x_{COS} < 10^{-7}$) неправомерно; более вероятно значение $x_{COS} \approx 10^{-4,5}$, полученное при допущении равновесия между породами литосферы и газами атмосферы [7]. Эта величина и использована при расчетах по уравнениям табл. 2 кривых равновесных концентраций различных форм серы (рис. 4). Очевидно, при дальнейших исследованиях значение x_{COS} будет уточнено. Тогда каждая из полученных кривых сместится на величину отклонения x_{COS} от принятого нами значения, однако взаимное расположение этих кривых останется прежним.

В области тропосферы ниже ~ 36 км рассчитанные равновесные концентрации O_2 , NO , NO_2 , HCN , CH_2N_2 , $HNCS$ (уравнения (3), (6)–(9), (16)) ничтожно малы ($< 10^{-11}$ об.%) и поэтому на рис. 4 не показаны. Крайне низкие равновесные концентрации

O₂ можно согласовать с результатами прямых замеров АМС «Венера-6» на уровне ~30 км (табл. 1), если расценивать последние лишь как нижний предел чувствительности приборов; возможна также недостаточная избирательность принятого метода анализа.

В силу неопределенностей, заложенных в используемой модели T–P–h атмосферы, в экспериментальном определении содержаний газов и величинах термодинамических констант, оценки равновесных концентраций вероятны лишь в пределах порядка величины.

Среди микрокомпонентов тропосферы Венеры определенную роль могут играть соединения галогенов. Расчет равновесий с участием хлора (уравнения (17)–(19) табл. 2) показал, что во всей области тропосферы ниже ~36 км равновесные концентрации HCl на много порядков превышают концентрации Cl₂, CHCl₃, CCl₄.

На рис. 4 кривые распределения содержаний H₂O, NH₃, COS показаны не только в той области тропосферы, где возможно равновесное сосуществование газов, но и выше ~36 км (пунктир). Кривая H₂O дана исключительно по результатам наблюдений: прямые разновысотные замеры АМС «Венера-4, 5, 6», радиоастрономические оценки, новые данные АМС «Венера-9» (табл. 1). Кривая вертикального распределения содержаний аммиака выше ~36 км, построенная по экспериментальным (табл. 1, уровни ~46, ~65 км) и расчетным (уровень ~36 км) данным, согласуется также с радиоастрономическими и радиолокационными оценками NH₃ для нижней атмосферы Венеры (табл. 1). Изменение концентрации COS на ~1,5 порядка в интервале высот от ~52 до ~65 км показано по данным Р.Г.Принна [17].

Таким образом, на рис. 4 сведены основные результаты, обобщающие комплекс экспериментальных и расчетных данных о распределении содержаний воды и малых компонентов углерода, азота и серы в тропосфере Венеры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первое, что обращает на себя внимание на рис. 4, это неравномерность распределения многих малых компонентов по вертикальному T–P-профилю тропосферы Венеры. К этому выводу приводят и результаты теоретических расчетов (ниже ~36 км) и инструментальные данные (выше ~36 км). Не находят подтверждения ни представления о «закалке» термодинамических равновесий поверхности на уровне облаков [6], ни допущение о равномерном перемешивании H₂O, NH₃, COS в толще тропосферы [7, 18].

Чем же может быть обусловлена подобная неравномерность вертикального распределения компонентов в тропосфере — области активного конвективного перемешивания? Вероятно тем, что скорости этих физических процессов недостаточны для того, чтобы полностью затушевать эффекты, обусловленные различием химических процессов, управляющих поведением элементов в резко отличных друг от друга физико-химических условиях, царящих на разных уровнях тропосферы.

Планетарное расположение тропосферы (~80% всей массы атмосферы) таково, что тропосфера оказывается тонким пограничным слоем, состав которого должен испытывать влияние как процессов химического взаимодействия с подстилающей его твердой оболочкой планеты, так и фотохимических процессов, господствующих в верхней атмосфере. Представления о конкурирующем влиянии химических (термохимических) и фотохимических реакций на компонентный состав атмосферы в целом развивались ранее Д.Койпером [19] и Р.Ф.Мюллером [6, 20].

Таким образом, для построения геохимической модели, интерпретирующей картину распределения компонентов тропосферы, необходимо выделить зоны преобладающего влияния каждого из процессов, управляющих поведением элементов, и увязать границы этих зон с конкретными границами изменения химических и физических параметров тропосферы.

Мы выделяем три основные геохимические зоны тропосферы (рис. 4). Верхняя — зона преобладания фотохимических процессов, область низких T и P и сильно окислительной химической обстановки. Нижняя — зона преобладания обычных химических процессов, область изменения (снизу вверх) T и P от очень высоких до умеренно высоких, а химической обстановки — от окислительной до более восстановительной. Промежуточная — зона влияния обоих процессов, область промежуточных T , P и химической обстановки, область конденсатов облачного слоя. Опишем более подробно каждую из зон и обоснуем положение их границ.

Верхняя зона. В работах Р.Г.Принна [8, 17] показано, что несоответствие [7] между довольно высоким содержанием COS , предполагаемым у поверхности планеты, и низким верхним пределом концентрации COS на видимой границе облаков закономерно, если допустить расходование COS при фотохимических процессах, продуцирующих H_2SO_4^4 в надоблачном слое. Подтверждение активной роли этих процессов в верхней части тропосферы можно

⁴ Гипотеза сернокислотных облаков выдвинута в 1972–1973 гг. независимо Г.Т.Силлом и Э.Т.Янгом [21, 22].

найти в исследованиях А.А.Лациса [23], указывающих на то, что большая часть солнечной энергии поглощается выше уровня $\sim 300^\circ\text{K}$.

В последнее время среди американских исследователей «идентификация видимых облаков как концентрированной серной кислоты является всеобщим убеждением», тем не менее вопрос о нижней границе существования сернокислотных облаков остается дискуссионным [2]. По моделям Р.Г.Прннна [8, 17] нижняя граница разрушения H_2SO_4 проходит вблизи уровня ~ 52 км.

Экспериментальные данные рис. 4, с одной стороны, не противоречат представлению о существовании H_2SO_4 на видимой границе облаков, а с другой — вкупе с некоторыми физическими характеристиками, подтверждают уровень ~ 52 км как нижнюю границу преобладающего влияния фотохимических процессов. Именно к этому уровню приурочены резкое ослабление освещенности [1] и нижняя граница локального повышения температуры [5]. Разрушение серной кислоты должно приводить к выделению воды, что может обусловить максимум H_2O , обнаруженный прямыми замерах АМС «Венера-4, 5, 6» вблизи этого уровня. О резком ослаблении активности фотохимических процессов может свидетельствовать и максимум NH_3 , обнаруженный АМС «Венера-8».

Однако, если эта граница действительно проходит около 52 км, то замеренное содержание O_2 здесь (табл. 1) кажется слишком высоким и скорее может быть обусловлено методическими особенностями измерения. В применявшемся термохимическом способе определения кислорода роль окислителя вольфрама мог играть не только кислород, но и такой активный окислитель, как серная кислота, присутствие которой не предполагалось в ранних представлениях об атмосфере Венеры.

Н и ж н я я з о н а тропосферы, где преобладают обычные химические процессы, начинается от поверхности планеты. Возможность достижения химического равновесия в этих «сухих», но высокотемпературных условиях оценена положительно [24]. Как было показано ранее, состояние полного равновесного сосуществования газов не достигается выше ~ 36 км. Этот уровень, выделяемый по независимым физическим данным как предполагаемая нижняя граница облачного слоя (см. выше), принят нами в качестве верхней границы зоны преобладающего влияния химических процессов.

Перепад температур этой зоны от ~ 500 до $\sim 200^\circ\text{C}$ (рис. 4) обусловил изменение равновесных концентраций малых компонентов и увеличение степени их восстановленности с высотой. Однако при количественных оценках не учитывались

такие факторы, как скорость и обратимость исследованных реакций. Между тем, по крайней мере в верхней части этой зоны кинетические факторы безусловно должны играть важную роль. Об этом свидетельствует следующее.

При равновесных концентрациях метана (рис. 4, сплошная линия) на уровнях ~ 450 и $\sim 500^\circ \text{K}$ становится термодинамически возможным возникновение твердой фазы — графита (табл. 3). В то же время в рассматриваемых Т–Р-условиях не только процесс образования графита, но и обратимость равновесия (4) кинетически маловероятны (см., например, [25]). В совокупности с этим невозможность существования твердых частиц в области рэлеевской атмосферы CO_2 [1] позволяет снизить возможные концентрации метана на этих уровнях тропосферы до величин, отвечающих уравнению (5) (табл. 3, рис. 4, пунктир).

Таблица 3

**Равновесные концентрации метана, вычисленные
по уравнениям (4) и (5) табл. 2 для тропосферы Венеры
ниже уровня ~ 36 км**

| Т, °К | lg x_{H_2} | | lg x_{CH_4} | |
|-------|---------------------|--|-------------------------------------|--|
| | по рис. 4 | уравнение (4), сплошная кривая на рис. 4 | уравнение (5), пунктир на рис. 4 | |
| 450 | -5,2 | -2,0 | > -5,3 | |
| 500 | -5,6 | -6,0 | $\geq -6,8$ | |
| 605 | -6,4 | -10,6 | $\leq -9,4$ | |
| 745 | -7,3 | -15,2 | $< -11,8$ | |
| 770 | -7,4 | -15,9 | $< -12,4$ | |

При построении кривых рис. 4 не учтен также и физический процесс перемешивания масс газов, который безусловно должен приводить к уменьшению вычисленных градиентов концентраций⁵. Таким образом, полученная картина изменения содержаний малых компонентов нижней тропосферы не строго количественна, но отражает лишь общую тенденцию изменения химической обстановки с высотой.

⁵ На рис. 4 бросается в глаза странный узел пересечения кривых равновесных концентраций малых компонентов (~ 18 км). Интересно, что на этом уровне проводится верхняя граница близких к нулевым скоростей ветра [1, 26]. Случайно ли подобное совпадение или, может быть, оно отражает реальную ситуацию смены области полного химического равновесия областью ограниченного химического равновесия?

Промежуточная зона (~36–52 км) охватывает практически всю область облачного слоя. Границы ее отвечают физическим границам скачкообразного изменения градиента освещенности, более высокого (выше ~52 км) и более низкого (ниже ~36 км) [1]. Химический состав веществ этой зоны, подвергающийся влиянию и химических и фотохимических процессов, характеризуется нестабильной окислительно-восстановительной обстановкой и наличием конденсированных фаз.

В отличие от верхней и нижней зон область облачного слоя — иной геохимический мир. Это самая неравновесная зона тропосферы, где переменные по силе и направлению ветры перемешивают атмосферу разных облачных слоев и нарушают устанавливающиеся локальные равновесия. Процессы фазовых превращений протекают здесь в обстановке быстрой изменчивости химических и физических параметров, а химический состав и распределение компонентов не стабильны ни в пространстве, ни во времени.

Вопрос о составе конденсатов облачного слоя до сих пор не решен. В настоящее время основными «кандидатами» помимо серной кислоты остаются свободная сера ($S^{\circ}_{ТВ}$) [27] и аммонийные соли [28, 29]. Эти вещества могут быть компонентами облаков и ниже слоя H_2SO_4 , т. е. ниже уровня ~52 км.

Ясно, что процесс конденсации должен протекать в самом облачном слое. Поэтому при интерпретации результатов равновесных расчетов, выполненных нами вслед за К.А.Геттелем и Дж.С.Льюисом [18] для этой неравновесной зоны, мы исходим из следующего: если образование здесь какой-либо конденсированной фазы термодинамически невозможно, то кинетически оно также невозможно; если же образование какой-либо конденсированной фазы возможно термодинамически, то такая фаза должна быть оставлена в числе «кандидатов». При этом в силу турбулентных условий этой зоны считается, что максимумы концентраций H_2O и NH_3 (рис. 4) не являются прочно фиксированными на определенных уровнях облачного слоя, а могут периодически возникать и на других высотах⁶.

Оцененные с таких позиций результаты расчетов, выполненных для $x_{H_2O}^{max} = 10^{-2}$ и $x_{NH_3}^{max} = 10^{-3}$ (уравнения (20)–(22) табл. 2), позволяют оконтурить максимально широкие области облачного слоя, где возможно образование солей аммония (рис. 5). Снижение на порядок мольной доли одного из газов поднимает нижние границы этих областей на ~2–3 км. Наиболее вероятно формирование

⁶ Может быть, следствием подобного эффекта являются результаты нижнего замера NH_3 АМС «Венера-8» (табл. 1).

хлорида аммония (практически на всех уровнях облачного слоя) и сульфата аммония (выше ~40 км). Если эти соли действительно возникают, то в области повышенных концентраций воды (~46–52 км) возможно метастабильное существование их в водно-растворенной форме. Формирование свободной серы химическим путем термодинамически невозможно (уравнение (15) табл. 2), так как для подобного процесса необходимо, чтобы p_{H_2S} превысило p_{CO_2} . Но если $S^{\circ}_{(ТВ)}$ образуется при фотохимических реакциях [8, 27], то она может существовать в качестве метастабильной фазы.

Несмотря на то, что расшифровка ИК и УФ-спектров не подтверждает возможности обнаружения ниже сернокислотных облаков аммонийных солей [27, 30] и свободной серы [30], мы все же полагаем, что наличие их нельзя полностью отвергать. Такие метастабильные фазы могут периодически возникать в отдельных участках облачного слоя.

В самой нижней части облачного слоя, где тенденция к возрастанию равновесных концентраций CH_4 и образованию графита подавляется кинетическими факторами (рис. 4, табл. 3), не исключено формирование метастабильных сложных органических соединений промежуточных степеней окисления. Если графит не образуется по кинетическим причинам, то в поле его стабильности наиболее вероятно образование конденсированных ароматических соединений [25], например соединений смолисто-асфальтенового типа. Эти вещества, состоящие из С, Н, О, S, а часто и N, имеют жидкую, полужидкую или почти твердую консистенцию и буроватую или темно-бурю окраску [31], что согласуется с наблюдаемой желтоватой окраской облаков.

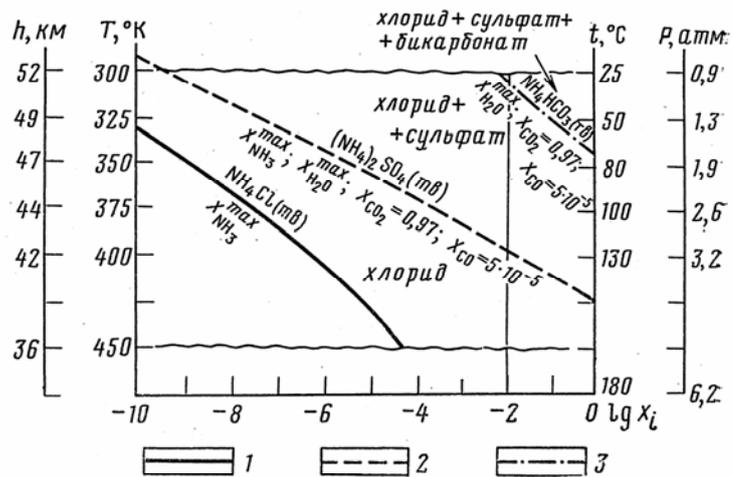


Рис. 5. Диаграмма полей устойчивости аммонийных солей, построенная для области облачного слоя тропосферы Венеры в координатах $T - \lg x_i$

Кривые равновесий твердая соль — газ рассчитаны по уравнениям (20)—(22) табл. 2 для концентраций газов, обозначенных у каждой кривой. $x_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{max}} = 10^{-2}$, $x_{\text{NH}_3}^{\text{max}} = 10^{-8}$ (рис. 4). 1 — x_{HCl} по уравнению (22); 2 — x_{SO_2} по уравнению (21); 3 — x_{NH_3} по уравнению (20)

Главные возражения против наличия органических веществ в облачном слое [32] базируются на том, что эти вещества не обнаружены при спектроскопических исследованиях и не стабильны в среднеокислительной обстановке. Но методом спектроскопии доступна лишь видимая граница облаков, где такие соединения действительно крайне маловероятны, а метастабильное существование органических веществ возможно и в среднеокислительной обстановке.

В предыдущем обсуждении состав тропосферы Венеры моделировался лишь пятикомпонентной системой. Возможно ли обнаружение здесь заметных количеств соединений иных элементов? Для ответа на этот частный вопрос необходимо сравнить общую экзогенную геохимию элементов на Венере и на Земле.

Специфика экзогенной геохимии элементов на Венере обуславливается высокими температурами поверхности и невозможностью существования там жидкой воды. Элементы, имеющие в земных условиях водную историю (например, Na, Cl, S) в условиях поверхности Венеры будут вести себя иначе. Те из них, которые образуют газообразные соединения, должны поступать в атмосферу (например, C, S, Cl и др.); те же, которые их не образуют, будут, как обычные литофилы, фиксироваться в коре (например, Na).

Следовательно, в тропосфере Венеры, где уже обнаружены соединения углерода, а наличие H_2SO_4 обосновывается сейчас достаточно веско, вполне вероятны и соединения хлора. Не исключено, что в нижней тропосфере Венеры содержания преобладающих газов хлора (HCl) и серы (COS) соизмеримы.

ВЫВОДЫ

1. Выполненные в работе теоретические исследования и обобщение комплекса космических инструментальных данных показывают высокую вероятность неравномерного вертикального распределения многих малых компонентов тропосферы Венеры (вода и некоторые соединения углерода, азота и серы). Главная причина неравномерности — различное поведение элементов в резко варьирующих физических и химических условиях разных уровней тропосферы.

2. Основа геохимической модели тропосферы Венеры — выделение в ее вертикальном профиле трех главных геохимических зон. Верхняя (выше ~52 км, ниже ~25° С) — зона преобладающего влияния фотохимических процессов, где сильно окислительная обстановка обеспечивает возможность существования H_2SO_4 в облачном слое. Нижняя (0–36 км, ~500–200° С) — зона преобладающего влияния химических процессов, протекающих, вероятно, в условиях равновесия, полного (внизу) или ограниченного (вверху), и приводящих к тенденции увеличения с высотой содержания CH_4 , H_2S , H_2 и убывания — SO_2 и S_2 . Промежуточная (~36–52 км, ~200–25° С, облачный слой) — зона преобладающего влияния физических процессов, обеспечивающих турбулентную, неравновесную обстановку и возможность метастабильного существования периодически возникающих и разрушающихся конденсированных фаз. Это могут быть фазы фотохимического (свободная сера) и химического генезиса — твердые или водно-растворенные сульфат и хлорид аммония (вверху) и сложные органические соединения и хлорид аммония (внизу).

3. Специфика общей экзогенной геохимии элементов на Венере по сравнению с Землей позволяет ожидать обнаружения в нижней тропосфере Венеры измеримых количеств HCl .

Авторы выражают признательность И.Л.Ходаковскому за полезные консультации.

Поступила в редакцию

15 марта 1976 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин А.Д., Маров М.Я. Физика планеты Венера. «Наука», М., 1974.
2. Hunten D.M. J. Atm. Sci., v. 32, №6, 1975.
3. Young A.T. J. Atm. Sci., v. 32, №6, 1975.

4. *Виноградов А.П., Сурков Ю.А., Флоренский К.П., Андрейчиков Б.М.* Докл. АН СССР, т. 179, №1, 1968.
5. *Авдеевский В.С., Ишевский В.Е., Маров М.Я., Мороз В.И.* «Правда», №21021, 21 февраля 1976.
6. *Mueller R.F.* Icarus, v. 3, №4, 1964.
7. *Lewis J.S.* Earth Plan. Sci. Lett., v. 10, p. 73, 1970.
8. *Prinn R.G.* J. Atm. Sci., v. 32, №6, 1975.
9. *Рыженко Б.Н., Волков В.П.* Геохимия, №7, 1971.
10. *Наумов Г.Б., Рыженко Б.Н., Ходаковский И.Л.* Справочник термодинамических величин. Атомиздат, М., 1971.
11. Краткий справочник физико-химических величин. «Химия», Л., 1972.
12. Термодинамические свойства неорганических веществ. Атомиздат, М., 1965.
13. Термодинамические константы веществ, вып. IV, ч. I. ВИНТИ, М., 1970.
14. *Kelley K.K., Anderson C.T.* US Bur. Min. Bull., p. 384, 1935.
15. *Карпов И.К., Киселев А.И., Летников Ф.А.* Химическая термодинамика в петрологии и геохимии. Иркутск, 1971.
16. *Pollack J.B., Young R.E.* J. Atm. Sci., v. 32, №6, 1975.
17. *Prinn R.G.* Science, v. 182, №4117, 1973.
18. *Goettel K.A., Lewis J.S.* J. Atm. Sci., v. 31, №3, 1974.
19. *Койнер Д.* В сб.: Атмосферы Земли и планет. Изд-во иностр. лит-ры, М., 1951.
20. *Mueller R.F.* Science, v. 141, p. 1046, 1963.
21. *Sill G.T., Carm O.* Commun. Lunar Planet. Lab., v. 9, №171, 1972.
22. *Young A.T.* Icarus, v. 18, №4, 1973.
23. *Lacis A.A.* J. Atm. Sci., v. 32, №6, 1975.
24. *Mueller R.F., Kridelbaugh S.J.* Icarus, v. 19, №4, 1973.
25. *Экк Р.В., Липпинкот Э.Р., Дайхоф М.О., Пратт И.Т.* В сб.: Возникновение органического вещества в солнечной системе. «Мир», М., 1969.
26. *Ainsworth J.E., Herman J.R.* J. Geophys. Res., v. 80, №1, 1975.
27. *Harpe V.A., Nelson R.* J. Atm. Sci., v. 32, №6, 1975.
28. *Сурков Ю.А., Андрейчиков Б.М., Калинин О.М., Гречищева И.М.* В сб.: Очерки современной геохимии и аналитической химии (к 75-летию акад. А.П.Виноградова). «Наука», М., 1972.
29. *Сурков Ю.А., Андрейчиков Б.М.* Геохимия, №10, 1973.
30. *Pollack J.B. et al.* J. Atm. Sci., v. 32, №6, 1975.
31. *Эрих В.Н.* Химия нефти и газа. «Химия», Л., 1969.

ON THE GEOCHEMICAL MODEL OF THE CYTHEREAN TROPOSPHERE

K.P.FLORENSKY, V.P.VOLKOV, O.V.NICOLAEVA

V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry,

USSR Academy of Sciences, Moscow

The geochemical model of the Cytherean troposphere (0–65 km) based on the theoretical generalization of the presently known experimental data as well as the thermodynamical analysis of the equilibria in the system O–H–C–N–S is proposed. The main base of the model is represented as the conception of the geochemical zoning of the troposphere.

The upper zone (higher than ~52 km) is characterized by predominant photochemical processes and presumably is comprised with sulfuric acid clouds.

The lower zone (0–36 km) is characterized mainly by chemical processes in the homogeneous gaseous media presumably in the equilibrium conditions.

Nonequilibrium chemical and photochemical processes are assumed to be the general feature of the intermediate zone (~36–52 km). Complexity and nonstability of the gaseous and condensate composition are assumed to represent one of the main peculiarities of this zone. The ammonia salts, sulphur as well as certain complex organic compounds are proposed as the probable candidates of the cloud condensate particles of this zone.