

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ

МЕЖПЛАНЕТНОЙ СТАНЦИЕЙ «ВЕНЕРА-4»

Академик А.П.Виноградов, Ю.А.Сурков, К.П.Флоренский, Б.М.Андрейчиков

Введение. После открытия мощной атмосферы Венеры, сделанного в 1761 г. М.В.Ломоносовым, производились многочисленные попытки изучения ее характеристик с помощью наземных средств наблюдений. Методом инфракрасной спектроскопии было достаточно надежно определено присутствие лишь CO_2 , содержание которой, однако, разными авторами предполагалось от нескольких до 100%. Существующие указания на наличие других газов (H_2O , N_2 , O_2 и др.) оспаривались до последнего времени (¹). Недостаток фактического материала привел к появлению многочисленных моделей атмосферы Венеры, построенных на произвольно выбранных характеристиках. Пролет космического корабля Маринер-2 вблизи Венеры в 1962 г. не внес существенной ясности в состояние вопроса. Стало очевидным, что только прямые измерения основных параметров атмосферы могут дать надежную основу для интерпретации наземных наблюдений и геохимической характеристики поверхности планеты.

1. Постановка эксперимента. 12.VI.1967 г. был осуществлен запуск советской межпланетной станции Венера-4, которая после 128 суток полета подошла к планете и, пройдя ее атмосферу, совершила первую мягкую посадку на ее ночной поверхности. Впервые путем непосредственного измерения был определен почти линейный ход температуры атмосферы Венеры, начиная с высоты примерно 26 км и до поверхности планеты. На этом участке температура изменялась от $25 \pm 10^\circ$ до $270 \pm 10^\circ$. Соответствующее изменение давления составляло от 0,7 до 20 атм., ход его очень близок к адиабатическому (²).

Основной научной задачей станции Венера-4 являлось исследование физико-химических характеристик атмосферы Венеры. Станция состояла из двух основных частей — орбитального отсека и спускаемого аппарата. Спускаемый аппарат имел вес 383 кг

и форму, близкую к шару, диаметром около 1 м. На нем были установлены приборы для определения температуры, давления и химического состава атмосферы планеты. Все измерения производились в атмосфере планеты во время парашютного спуска спускаемого аппарата.

Химический состав атмосферы Венеры определялся газоанализаторами, специально разработанными нами для этой цели. На спускаемом аппарате находилось 11 газоанализаторов, которые были собраны в две группы — первая состояла из 5 анализирующих ячеек, вторая — из 6. Газоанализаторы срабатывали по командам программного временного устройства. Первая партия газоанализаторов сработала в атмосфере Венеры при давлении около 550 мм, вторая — около 1500 мм. Температура среды, где производились измерения, была соответственно $25 \pm 10^\circ$ и $90 \pm 10^\circ$.

2. Аппаратура и методы определения химического состава атмосферы. Из многочисленных возможных методов определения состава нами были использованы наиболее простые и надежные физико-химические методы, основанные на хорошо изученных реакциях, обладающих достаточной избирательностью. Для повышения надежности результатов были установлены как пороговые, так и амплитудные датчики с дублирующими определениями. Каждый газоанализатор представлял собой цилиндр определенного объема, разделенный на два отсека мембраной. В одном из отсеков находился химический поглотитель, поглощающий заданную компоненту. До момента измерений оба отсека вакуумировались и герметизировались. При анализе атмосфера вводилась одновременно в оба отсека, которые затем вновь герметизировались. Для определения основных компонентов атмосферы производилась регистрация разности давлений, возникавшей в отсеках в результате поглощения одной из компонент. Для анализа компонентов, присутствующих в атмосфере в малых количествах, использовались более чувствительные физико-химические методы (основанные на измерении возникающей в разных ячейках разности сопротивлений специально подобранных химических поглотителей, разности теплоотдачи специальных токопроводящих элементов и др.). С помощью данных газоанализаторов было определено содержание в атмосфере Венеры CO_2 , N_2 , O_2 и H_2O . Определения велись в широком интервале их возможных концентраций ввиду большого разброса и неопределенности исходных данных по наземным наблюдениям. В настоящей статье рассматриваются результаты предварительной обработки полученной информации.

3. Результаты измерений. Результаты определения химического состава атмосферы Венеры приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, наличие CO_2 подтверждено 4 датчиками, показания которых распределяются следующим образом: больше 1%, больше 1%, больше

30% и $90 \pm 10\%$. Хотя для амплитудного датчика ошибка определения CO_2 достигала $\pm 10\%$ из-за наложения внешних неточностей, мы склонны считать, что содержание CO_2 в атмосфере Венеры составляет не менее 90% (кислые пары HCl и т. д., ранее обнаруженные в атмосфере Венеры путем наземных наблюдений в количестве меньше 0,01%, не могли влиять на результаты измерения).

Таблица 1

Условия анализа	Определяемый компонент	Тип датчика	Принцип работы датчика	Предел измерений или порог	Результаты измерения
1 - я группа анализаторов					
H ~ 26 ± 1 км P ~ 550 мм t ~ $25 \pm 10^\circ$	CO_2	Пороговый	Теплопроводность	Порог 1%	Больше 1%
	CO_2	Амплитудный	Поглощение КОН	7–100%	$90 \pm 10\%$
	N_2	Амплитудный	После поглощения CO_2 и O_2 — поглощение $\text{N}_2 \rightarrow \text{Zr}$ при 1000°	7–100%	Меньше 7%
	O_2	Пороговый	W (перегорание нити при 800°)	Порог 0,4%	Больше 0,4%
	H_2O	Пороговый	Поглощение P_2O_5 , измерение электропроводности	Порог 0,1%	Больше 0,1%
2 - я группа анализаторов					
H ~ 19 ± 1 км P ~ 1500 мм t ~ $90 \pm 10^\circ$	CO_2	Амплитудный	Поглощение КОН	2–30%	Больше 30%
	CO_2	Пороговый	Поглощение КОН	Порог 1%	Больше 1%
	N_2	Амплитудный	После поглощения CO_2 и O_2 — поглощение $\text{N}_2 \rightarrow \text{Zr}$ при 1000°	2,5–60%	Меньше 2,5%
	O_2 ($\pm \text{H}_2\text{O}$)	Пороговый	Испарение фосфора	Порог 1,6%	Меньше 1,6%
	H_2O	Пороговый	Поглощение P_2O_5 , измерение электропроводности	Порог 0,05%	Больше 0,05%
	H_2O	Амплитудный	Поглощение CaCl_2	Порог 0,7%	Меньше 0,7%

Датчики азота дважды показали отсутствие заметных количеств его в атмосфере Венеры. Одно отрицательное значение получено при номинальной пороговой чувствительности датчика в 7%, другое — при пороговом значении в 2,5%. Учитывая, что

второе определение имело большую (однако не перекрывающую порог первого измерения) относительную ошибку, порогом содержания азота менее 7% можно считать надежно установленным этими двумя измерениями.

Содержание O_2 оказалось между двумя пороговыми значениями датчиков, работавших на разных принципах. В одном датчике мгновенно перегорела вольфрамовая нить (при температуре около 800°), рассчитанная на порог около 3 мм парциального давления O_2 в объеме датчика, что соответствует 0,5% газа при давлении 550 мм. Другой датчик основан на поглощении O_2 возгоняющимися парами фосфора; образующийся при этом P_2O_5 способен поглотить водяные пары. Датчик, рассчитанный на пороговое значение поглощенной смеси $H_2O + O_2$ в 1,6%, дал отрицательное показание. Из данных совместного определения смеси $H_2O + O_2$, как мы ниже увидим, содержание O_2 не может быть выше 1–1,5%.

Вода определялась тремя датчиками. В верхней точке ($H \sim 26$ км) датчик с P_2O_5 , определяющий сумму парообразной и сконденсированной воды, дал содержания H_2O больше 0,65 мг/л, что соответствует величине больше 0,1% или температуре конденсации выше -22° . И нижней точке ($H \sim 20$ км) содержание водяного пара по датчику с P_2O_5 оказалось также более 0,65 мг/л (больше 0,05%), а по датчику давления с поглотителем $CaCl_2$ менее 11 мм (меньше 0,7%), что соответствует температуре конденсации менее 15° . Так как прибор в это время имел температуру не менее 25° , то потерю давления за счет конденсации пара в приборе следует признать совершенно незначительной, и можно считать, что определен истинный верхний предел давления пара H_2O .

Таким образом, возможный интервал давления пара в разных слоях атмосферы Венеры заключается между 0,65 и 11 мм, что соответствует температурам конденсации в -22 и $+15^\circ$, т. е. существование капельно-жидкой воды возможно лишь в облачном слое, так как условия поверхности Венеры (температура 270° и давление ~ 20 атм.) лежат далеко за пределами поля существовать жидкой воды.

4. Обсуждение результатов. Подытоживая общий результат анализов, можно принять следующий состав атмосферы Венеры: CO_2 $90 \pm 10\%$; O_2 больше 0,4% и меньше 1,5%; N_2 меньше 7%; H_2O 1–8 мг/л.

Как видно из всех данных, содержание O_2 в атмосфере Венеры меньше 1%, а N_2 ниже 7% и, вероятно, не достигает 2–4%. Этот состав исключает значительную роль других газов, которые предполагались некоторыми исследователями. В то же время не исключено присутствие в атмосфере Венеры аргона и других инертных газов. Содержание Ar можно оценить по содержанию N_2 . Знание полного состава атмосферы позволяет рассчитать и некоторые возможные равновесные примеси, возникающие в результате фотохимических

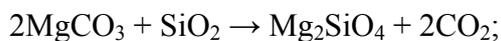
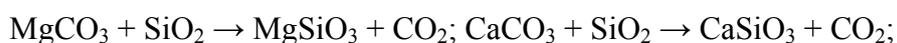
реакций. В целом атмосфера Венеры оказалась окислительной и наиболее соответствующей парниковой модели.

Приведенные данные могут быть несколько уточнены после полной обработки результатов эксперимента и учета всех возможных эффектов.

Если сравнивать современные атмосферы Венеры и Земли, мы получаем крайне интересные результаты: общее количество дегазированных продуктов для обеих планет находится в пределах одного полупорядка за исключением потерянного Венерой водорода.

Углерод в земной коре связан с карбонатами осадочных пород и составляет около $2 \cdot 10^{23}$ г CO_2 (³). Если выделить весь CO_2 из карбонатов и гидросферы Земли в атмосферу, масса ($5 \cdot 10^{21}$ г) атмосферы увеличится в ~ 40 раз, т. е., грубо говоря, давление газа будет около 40 атм. Полное количественное соответствие с Землей достигается при условии, если допустить, что $\sim 1/2$ возможного содержания CO_2 находится на Венере в осадочных породах в связанном состоянии, а другая — в атмосфере.

Если принять на Венере давление CO_2 , равное ~ 20 атм., то условия карбонатно-силикатного равновесия таковы, что карбонаты магния и кальция должны при температуре около 300° начать разлагаться. Условия этого равновесия изучались неоднократно (например, (⁴)), в различных вариантах реакций типа



и были предложены для объяснения повышенного количества CO_2 в атмосферах планет. Совершенно несомненно, что все эти реакции на поверхности Венеры резко сдвинуты вправо.

Источником N_2 в атмосфере Венеры был NH_4 , как и на Земле, где он дегазируется вулканически в виде NH_4Cl , который возгоняется при температуре $\sim 350^\circ$. На Венере из-за огромного количества CO_2 он должен находиться в виде $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$. Однако $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ разлагается при температуре 58° . Иными словами, в атмосфере Венеры может находиться аммиак. NH_4Cl — прочная молекула, а NH_3 легко окисляется O_2 до N_2 .

Если мы примем за вероятное содержание азота около 3–4%, а O_2 меньше 1%, то простое умножение на давление 20 атм. дает то же количество азота и кислорода в атмосфере Венеры, как и содержание этих газов в атмосфере Земли (78 и 21% соответственно). Вряд ли все эти совпадения могут быть случайными. Скорее всего, они говорят за то, что эндогенные процессы, а именно, выплавление вещества коры и процессы дегазации планет равного размера, идут по одному пути, и лишь последующая история

атмосфер меняет их облик в зависимости от близости к Солнцу, массы планеты, определяющей степень диссипации атмосферы и других экзогенных факторов (³).

Из-за более близкого расположения Венеры к Солнцу ее равновесная температура выше 50°. Это, независимо от других факторов, обусловило переход в значительных количествах в атмосферу Венеры воды и углекислоты. Появление воды и углекислоты в атмосфере в значительных количествах, в свою очередь, вызвало огромное поглощение атмосферой солнечного тепла и вместе с тем значительную фотодиссоциацию воды и углекислоты при отсутствии достаточного защитного действия азота и кислорода в атмосфере и ее высокой температуры, причем образовавшийся кислород поглощался породами поверхности Венеры. СО — продукт фотодиссоциации углекислоты не сохранился и рекомбинировался в СО₂ благодаря наличию кислорода от сопряженной реакции — фотодиссоциации воды. Водород при этих условиях, высокой температуре поверхности Венеры, диссипировал. Это все привело к саморазогреванию атмосферы, образованию тепличного эффекта. Вероятно, какой-то пай тепла привносился из недр планеты. Когда температура поверхности Венеры достигла приблизительно 250–300°, очень многие карбонаты реагировали с силикатами, освобождая в атмосферу огромное количество углекислоты. Из полученных данных температуры и давления атмосферы на Венере следует, что вода должна кипеть при температуре свыше 200°.

Таким образом, по эндогенным процессам Земля и Венера очень близки. В то же время экзогенные процессы, которые зависят в первую очередь от температуры поверхности (т. е. близости к Солнцу), привели к образованию разных атмосфер. Возникшие на поверхности Венеры условия привели в результате процессов саморегулирования к образованию тяжелой атмосферы. В этих условиях поверхностные породы Венеры должны были подвергнуться глубокому разрушению. Существование подобной агрессивной атмосферы в условиях ее интенсивного движения, вероятно, привели к нивелированию поверхности планеты.

В заключение авторы выражают благодарность О.М.Калинкиной и И.М.Гречищевой за участие в разработке газоанализаторов.

Ин-т геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского

Академии наук СССР

Поступило 19.XII.1967

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ *W.W.Kellogg, C.Sagan, The atmospheres of Mars and Venus, 1961.*

² «Правда», 30.X.1967, материалы пресс-конференции, стр. 3.

³ «Известия», 30.X.1967 г., материалы пресс-конференции, стр. 2.

⁴ *А.П.Виноградов*, Химическая эволюция Земли, Первое чтение им. Вернадского, Изд. АН СССР, 1959; Изв. АН СССР, сер. геолог., №11, 3 (1962).

⁵ *F. Weeks*, *J. Geology*, 64, 245 (1956).