

К ВОПРОСУ О СОСТАВЕ ПОЛЯРНЫХ ШАПОК МАРСА

Ю.В.Алехин, И.В.Закиров, А.Т.Базилевский, К.П.Флоренский

Институт экспериментальной минералогии АН СССР, Чернологовка

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

На основании анализа фазовой диаграммы системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ рассмотрен вероятный ход кристаллизации и сублимации вещества сезонных полярных шапок Марса. Установлено, что в случае квазиравновесного хода этого процесса каждая из полярных шапок Марса в момент ее наибольшего развития (зимой в соответствующем полушарии) должна иметь концентрически зональное строение: краевая зона льда H_2O , затем зона клатрата $\text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, далее зона льда CO_2 с малой примесью $\text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и, наконец, в центральной части шапки возможны участки стабильного сосуществования льда CO_2 и льда H_2O .

Полярные шапки Марса известны со времени первых телескопических наблюдений этой планеты, однако строение этих образований до сих пор во многих отношениях остается загадкой. После получения снимков КА «Маринер-7» окончательно утвердилось мнение, что наблюдаемые сезонные полярные шапки представляют собой маломощный покров снегообразного вещества [1]. Состав «снега» на полярных шапках с давних пор является предметом споров. Ряд исследователей полагали, что шапки сложены льдом H_2O [2, 3]. Другие рассматривали шапки как отложения твердой CO_2 [4, 5]. Обсуждалась также гипотеза о возможном участии в строении полярных шапок твердого клатратного соединения H_2O и CO_2 [6]. После наблюдений за полярными районами Марса с помощью космического аппарата «Маринер-9» среди исследователей укрепилось мнение, что главную

роль в строении полярных шапок играет твердая CO_2 , а наблюдения с аппаратов «Викинг-1» и «Викинг-2» за тающей северной полярной шапкой снова дали указания на присутствие в шапках льда воды.

Следует отметить, что каждая из упоминаемых выше гипотез опирается на те или иные фактические данные. Спектроскопическими наблюдениями с КА «Маринер-7» подтверждено наличие в области южной полярной шапки как твердой H_2O , так и твердой CO_2 [7]. ИК-наблюдения и анализ данных радиопросвечивания атмосферы, проведенные на КА «Маринер-7» и «Маринер-9», показывают, что температура в полярных областях Марса может опускаться до -150°K , что должно приводить к конденсации CO_2 [8, 9]. Наконец, имеются экспериментальные и расчетные данные, показывающие, что в поле давлений и температур, характерных для полярных шапок Марса, может быть устойчив газгидрат состава $\text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [10].

Представляется, что для дальнейшего прогресса в решении вопросов строения полярных шапок Марса полезно провести теоретический анализ равновесных фазовых отношений в системе $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ в условиях, характерных для полярных районов Марса. Для проведения такого анализа мы привлекаем диаграмму фазовых взаимоотношений в системе $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$, составленную Ю.В.Алехиным, В.А.Жариковым и И.В.Закировым [10], часть которой в несколько измененном и схематизированном виде воспроизводится в настоящей работе (рис. 1). Для получения этой диаграммы методами топологического анализа [11] была построена полная мультисистема стабильных фазовых ассоциаций 6 фаз системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ -льда (I), сухого льда ($S-\text{CO}_2_{\text{ТВ}}$), газгидрата ($H = \text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), газа (G), жидкости, богатой углекислотой (L_1 — в рассматриваемой части диаграммы эта фаза не реализуется), и существенно водной жидкости (L_2). Подробное описание методики построения схемы фазовых взаимоотношений приведено в работе [10].

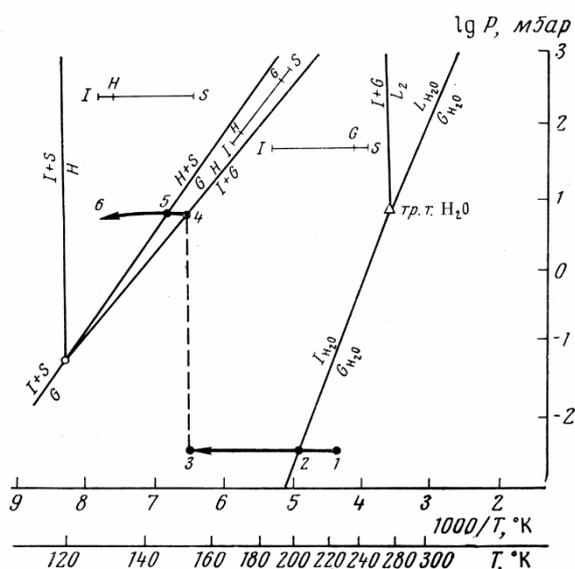


Рис. 1. Часть фазовой диаграммы системы $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$, построенной Ю.В.Алехиным и др. в 1970 г. [10]

I — лед H_2O ; S — лед CO_2 ; H — газгидрат состава $\text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; L_2 — жидкость, богатая H_2O , в чистой системе — жидкая вода. Сплошными линиями показаны границы моновариантных равновесий. Стрелками показан гипотетический ход равновесной кристаллизации компонентов атмосферы при росте полярных шапок Марса.

Мы придерживаемся общепринятой точки зрения, что вещество полярных шапок Марса образуется за счет конденсации из атмосферы. Поэтому зная хотя бы ориентировочно состав атмосферы, а также атмосферное давление на поверхности и ход температур в течение марсианского года в полярных областях, можно по схеме фазовых взаимоотношений проследить ход равновесной кристаллизации (и сублимации) в полярных шапках и, таким образом, построить модель строения полярных шапок Марса.

В качестве исходных данных для последующих построений примем, что давление CO_2 у поверхности Марса на условном среднем уровне равно $6,5 \text{ мбар}$, что примерно соответствует условиям в северной полярной области [9]. В пределах южной полярной области давление CO_2 у поверхности в среднем несколько ниже и составляет около 5 мбар [9], что должно приводить к небольшому уменьшению температуры

равновесных фазовых переходов (рис. 1). Содержание осажденной H_2O в вертикальном столбе атмосферы, по-видимому, в среднем меньше 100 *мкм*, но больше 10 *мкм* [12–14]. По этим данным для случая хорошо перемешиваемой атмосферы верхний предел парциального давления H_2O у поверхности Марса можно оценить величиной $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ *мбар*.

Температура в полярных областях в летний сезон в среднем близка к 220°K при амплитуде суточных колебаний порядка 100° [15]. В зимний сезон в центральных областях южной полярной шапки зарегистрированы температуры до $145\text{--}155^\circ \text{K}$ [9] и не исключено, что на отдельных участках в центральной части шапок температура поверхности может быть еще ниже. ИК-измерения (с разрешением по поверхности около 100 *км*), проведенные с орбитального отсека аппарата «Викинг-1», показывают, что в середине зимнего сезона яркостные температуры поверхности в пределах южной полярной шапки могут снижаться до 134°K . Как уже говорилось, образование полярных шапок Марса, вероятно, есть процесс конденсации компонентов атмосферы при понижении температуры. При этом давление атмосферы за счет притока газа из района антиподной тающей полярной шапки должно оставаться приблизительно постоянным. В принципе, однако, возможен случай такого интенсивного вымораживания атмосферы на одном из полюсов, которое лишь частично компенсируется ветровым притоком газа, и тогда над полярной областью может возникать депрессия давления, не связанная с превышением района над средним уровнем поверхности планеты.

Рассмотрим процесс образования полярных шапок в рамках привлекаемой нами схемы фазовых взаимоотношений в системе $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{CO}_2$ (рис. 1). Если в летний период средняя температура в полярных областях близка к 220°K , то парциальное давление воды в атмосфере, равное $4 \cdot 10^{-3}$ *мбар* (верхний предел оценки $P_{\text{H}_2\text{O}}$), меньше давления насыщенного пара надо льдом и вода должна оставаться в газовой фазе

(линия 1–2 на рис. 1). При суточных колебаниях температуры, приводящих к снижению ее ночью менее чем до 200° К, на поверхности должен конденсироваться лед H₂O, однако в дневное время он будет сублимировать, не образуя устойчивого покрова.

В осенний период с падением средней температуры ниже 200° К будет происходить вымораживание из атмосферы H₂O и образование устойчивого снегового покрова льда H₂O (линия 2–3 на рис. 1).

Зимой при понижении температуры примерно до 150° К с образовавшимся ранее льдом должен начать реагировать углекислый газ и в результате этой реакции должен образоваться газгидрат CO₂·6H₂O. Поскольку здесь в реакцию вступает основной компонент атмосферы (CO₂), реакция происходит при давлении около 5 мбар в южной полярной области и давлении около 6,5 мбар в северной полярной области изобарически за счет притока новых порций CO₂ (линия 4–5 на рис. 1). При дальнейшем понижении температуры очень быстро достигается линия моновариантного равновесия реакции конденсации из газовой смеси H₂O и CO₂ газгидрата CO₂·6H₂O и льда CO₂ ($G \leftrightarrow H + S$). При давлении газовой смеси 5 мбар температура реакции на 2–3° ниже. Поскольку содержание H₂O в атмосфере очень невелико, главным компонентом конденсата будет лед CO₂ (~99%). В этих условиях не исключена возможность реализации упоминавшегося выше случая, когда конденсация CO₂ будет лишь частично компенсирована притоком газа. Поэтому на рис. 1 линия 5–6, отражающая ход температуры, условно отклонена в сторону меньших давлений.

Поле конденсации твердой CO₂ (с примесью газгидрата) достаточно широко и, по-видимому, в большинстве случаев — это самая низкотемпературная реакция на полярных шапках Марса. Однако когда температура поверхности упадет ниже 125° К, что в свете ИК-наблюдений «Викинга-1» [16] представляется весьма возможным, то

будет достигнута линия моновариантного равновесия реакции разложения газгидрата на твердую CO_2 и лед H_2O ($H \leftrightarrow I + S$).

Похолодание и рост шапок идут в направлении от полюсов к низким широтам. Поэтому в то время как в краевых частях шапок происходит конденсация льда H_2O , в высоких широтах реализуются более низкие температурные фазовые переходы. Стадию конденсации льда H_2O проходит каждый участок шапки, а низкотемпературные стадии преобразования льда H_2O в газгидрат и совместной конденсации газгидрата и льда CO_2 имеют место только в центральных частях шапок. Реакция разложения газгидрата на лед H_2O и твердую CO_2 , вероятно, может реализоваться только в отдельных участках или вообще не имеет места.

Из сказанного следует, что равновесный сезонный ход кристаллизации полярных шапок Марса должен привести к возникновению в них зональности, которая в период их наибольшего развития будет иметь следующий вид (рис. 2): 1) краевая зона шапок должна быть сложена льдом H_2O ; 2) далее к полюсу она должна сменяться зоной развития газгидрата. Здесь под слоем газгидрата возможно нахождение метастабильного льда H_2O . Следует отметить, что поскольку реакция образования газгидрата идет в узком интервале температур ($3-5^\circ$), ширина этой зоны будет сравнительно невелика; 3) еще ближе к полюсу должна располагаться зона развития твердой CO_2 с примесью ($\sim 1\%$, оценка по методу «рычага») газгидрата. В нижней части снегового покрова здесь должно наблюдаться повышенное содержание газгидрата (захороненная газгидратная зона) и местами может сохраняться метастабильный лед H_2O ; 4) в отдельных участках центральной области шапок не исключено возникновение локальных зон, в которых газгидрат претерпевает разложение ($H \leftrightarrow I + S$), и здесь будут сосуществовать стабильная твердая CO_2 (основной компонент) и лед H_2O (примесь).

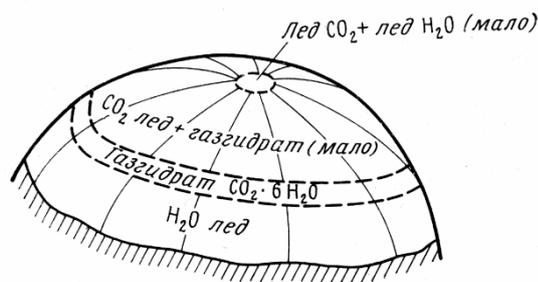


Рис. 2. Предполагаемая зональность фазового состава снегового покрова полярных шапок Марса в период их наибольшего развития (зимой)

Ширина зон на рис. произвольная

Таким образом, мы приходим к заключению, что сезонные полярные шапки Марса должны представлять собой многофазные зональные образования. В период максимального развития шапки в ней должны иметь место 3 или 4 зоны с различным составом снегового покрова. При деградации шапки количество зон в ней будет последовательно уменьшаться. В последнюю стадию существования шапки перед полным ее исчезновением она должна состоять из льда H_2O . При деградации зоны льда H_2O снеговой покров в марсианских условиях сублимирует в газ без образования жидкой H_2O . Суточные колебания температуры должны вызывать периодические колебания границ различных зон.

Характерной особенностью Марса является то, что его полярные шапки представляют собой своеобразные «морозильники», на которых конденсируется как основной компонент атмосферы — углекислота, так и примесный компонент — вода. Постоянное существование значительных масс воды и углекислоты в конденсированном состоянии в одной из полярных шапок Марса делает невозможным строгий учет их количеств на поверхности планеты по их содержанию в атмосфере. Поэтому известная обедненность атмосферы Марса водой еще не есть свидетельство обеднения водой всей планеты в целом. Более того, опережающее вытаивание углекислоты по сравнению с водой при

сезонных деградациях полярных шапок должно приводить к обогащению остатка льдом воды и при повторении этого процесса из года в год применительно к среднегодовой температуре в полярных зонах (190–200° К) там могут накапливаться запасы конденсированной воды.

Возвращаясь еще раз к вопросу о минералогической зональности полярных шапок, следует подчеркнуть, что наши построения основаны на предположении о равновесном ходе реакций конденсации и сублимации и поэтому, естественно, носят гипотетический характер. Неравновесные взаимоотношения фаз, которые в условиях низких температур весьма вероятны, могут в какой-то степени изменять картину явлений, и реальный минералогический состав полярных шапок Марса может в чем-то отличаться от предложенной схемы. Кроме того, присутствие заметных количеств аргона в марсианской атмосфере (1–2% по [17]) ставит также вопрос о возможном участии в составе полярных шапок Марса твердых гидратов этого газа [18–21].

Поступила в редакцию
22 марта 1977 г.

Литература

1. *Sharp R.P. et al* J. Geophys. Res., v. 76, №2, 1971.
2. *Dolfus A.* Ann. Astrophys., Suppl. №4, 1957.
3. *Miyamoto S., Hattori A.* Icarus, v. 9, №3, 1968.
4. *Leighton R.B., Murray B.C.* Science, v. 153, №3732, 1966.
5. *O'Leary B.T., Rea D.G.* Science, v. 155, №3760, 1967.
6. *Miller S.L., Smythe W.D.* Science, v. 170, №3957, 1970.
7. *Herr K.C., Pimentell G.C.* Science, v. 166, №3904, 1969.
8. *Neugebauer G. et al* Science, v. 166, №3901, 1969.
9. *Kliore A.J. et al* J. Geophys. Res., v. 78, №20, 1973.
10. *Алехин Ю.В., Жариков В.А., Закиров И.В.* В сб.: Итоги науки и техники. Сер. геохимия, минералогия, петрография, т. 7. ВИНТИ, М., 1970.

11. *Скрейнмакерс Ф.А.* Нонвариантные, моновариантные и дивариантные равновесия. Изд-во иностр. лит., М., 1948.
12. *Мороз В.И. и др.* Докл. АН СССР, т. 208, №4, 1973.
13. *Barker E.S. et al.* Science, v. 170, №3964, 1970.
14. *Conrath B. et al.* J. Geophys. Res., v. 78, №20, 1973.
15. *Morrison D. et al.* Icarus, v. 11, №1, 1969.
16. *Kieffer H.H. et al.* Science, v. 193, №4255, 1976.
17. *Nier A. O. et al.* Science, v. 193, №4255, 1976.
18. *Villard P.* Compt. Rend., v. 123, №2, 1896.
19. *Forcrand R.* Compt. Rend., v. 176, №4, 1923.
20. *Tamman G.H., Krige G.J.* Z. anorgan. und allgem. Chem., v. 146, №1/2, 1925.
21. *Никитин Б.А.* Избранные труды. Изд-во АН СССР, М., 1956.

ON THE COMPOSITION OF POLAR CAPS OF MARS

Yu.V.ALEKHIN, I.V.ZAKIROV, A.T.BASILEVSKY, C.P.FLORENSKY

Institute of experimental mineralogy, USSR Academy of Sciences, Chernogolovka,

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

Using the analysis of phase diagram of system H_2O-CO_2 a probable sequence of crystallization and sublimation of the material of seasonal polar caps of Mars is considered. The conclusion is made that if this process has a quasiequilibrium character then every martian polar cap at the moment of its maximum expansion (in the winter at the appropriate hemisphere) should be concentrically zoned: marginal zone of H_2O ice, then zone of clathrate $CO_2 \cdot 6H_2O$, further zone of CO_2 ice with a small admixture of $CO_2 \cdot 6H_2O$ and lastly at central part of the cap the areas of stable coexistence of CO_2 ice and H_2O ice are possible.