

УДК 523.34+523.41+523.43+551.1:551.240.089

Я. Ю. БРОУЛЬ, Г. Н. КАТТЕРФЕЛЬД

ГЕНЕЗИС КОЛЬЦЕВЫХ И РАДИАЛЬНО-
КОНЦЕНТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

«Когда в твердую матерю, наподобие доски плотную, каковы суть зеркальные и оконничные стекла, лед, каменные плиты и другие, сим подобные, удар воспоследует, то по большей части бывает, что щели от места ударенного, как от центра лучи, в стороны проскакивают, хотя не совсем равно и прямо, но разными фигурами и нагибами, что с механическими правилами согласно. Подобным образом, когда ровная поверхность дна морского подымалась, тогда от центра действующей силы и от подымающейся выше всех земной части прошли великие щели и стали впадины и долины... Не инако рассуждать должно и о впадинах, кои... во включенные моря и озера превратились.. Щели должны от того места расходиться в стороны на вышину гор, включающих такое море или озеро».

(М. В. Ломоносов, 1763)

I

Введение

Вулканизм и плутонизм были основными процессами, сформировавшими значительную часть вещества, слагающего кору Земли, Марса, Луны и Меркурия. Это положение теперь уверенно обосновано химией и геологией планет, дающими хорошую основу для планетологических построений о вулкано-магматических формациях на поверхности Луны, Марса и других планет Солнечной системы.

В настоящее время имеется много данных о вулканизме на Луне, Марсе и Меркурии и о его достаточно большой рельефообразующей роли. Эти планеты имеют не только экзогенные—метеоритные, но и эндогенные—вулканотектонические кольцевые структуры и формы рельефа, большей частью весьма древнего возраста. Большие кольцевые структуры и кратеры (выявленные радиолокационным зондированием) существуют также на Венере, плотная атмосфера которой делает мало вероятным их метеоритный генезис. Поэтому Луна, Меркурий и Марс представляют особый интерес для решения вопросов о происхождении и развитии древних (а потому сильно эродированных) кольцевых структур на нашей планете.

Труднейшей проблемой современной селенологии и ареологии является уже не доказательство существования лунного и марсианского

вулканизма, а расшифровка тех рельефообразующих механизмов, которые ответственны за происхождение различных типов кольцевых структур на поверхности планет. Эти вопросы до сих пор во многих отношениях остаются открытыми, хотя они и были предметом серьезного обсуждения в планетологической литературе (Э. Зюсс, Дж. П. Спёрр, А. В. Хабаков, К. фон Бюлов, Дж. Кейпер, Дж. Филдер, П. Мур, П. Кэттермол, Дж. Грин, В. Эльстон, Г. Н. Каттерфельд, К. Бенеш, Дж. МакКолл, П. Леонарди, В. А. Бронштэн, А. В. Авдеев, Г. С. Штейнберг, Ю. А. Ходак, Р. Пайк, А. Л. Суханов и многие другие [1—11, 19—28 и др.]).

Геолого-морфологическое изучение крупных кольцевых структур Луны, Марса и Меркурия приводит к важному заключению, что они представляют комплекс образований, каждое из которых имеет свою индивидуальную историю, длительностью от нескольких миллионов до 4,5 миллиардов лет. Среди кратеров и цирков различаются структуры, имеющие признаки взрывного происхождения (метеоритные кратеры, маары) и структуры с признаками постепенного, весьма длительного развития (кальдеры, вулкано-тектонические депрессии).

Принимая во внимание эти основные положения, многие планетологи, анализируя большие кольцевые структуры, избегают обозначать их термином «кратер» (не уместным для больших кольцевых форм) и предпочитают другие, более сложные термины.

Среди кольцевых форм Луны, Марса и Меркурия различаются две главные структурные группы:

I—*кратеры* (малые формы вулканического или метеоритного происхождения, а также эндогенно-экзогенные формы смешанного происхождения— “impact-induced volcanism”).

II—*горные цирки*. В свою очередь, эти две группы подразделяются на несколько более дробных типов, отражающих большое разнообразие кольцевых образований [5, 23, 24].

Кольцевые структуры типа *Моря Восточного* на Луне (фото 1) и *Моря Жары* на Меркурии (фото 2) относятся к более крупным формам, образуя группу, промежуточную между цирками и типичными круговыми морями.

К этой группе могут быть отнесены также: на Луне—талассоид *Королев* (2 концентрических кольца, с диаметром внешнего кольца $D_e = 430$ км); на Марсе—*Изида* (4 неполных кольца, $D_e \approx 1900$ км), *Арги́ра* (3 или 4 кольца, $D_e \approx 1200$ км), *Идумея* (3 кольца, $D_e = 450$ км), *Япигия* (2 кольца, $D_e \approx 450$ км); марсианский *Шрёдингер* (2 кольца и $D_e = 200$ км); на Меркурии—двухкольцевые *Море Юпитера* ($D_e \approx 650$ км, D_i (цирк *Толстой*) ≈ 300 км), горные цирки *Гомер*, *Гендель*, *Родэн*, *Рэн*, *Ренуар*, *Репин*, *Чехов*, *Тьягараджа*, *Бальзак*, *Марк Твэн*, *Вивальди*, *Ван Мэн*, *Дюрер*.

Можно предполагать, что большая часть и всех остальных кольцевых структур Марса и Меркурия с диаметрами свыше 200 или 300 км имеет 2-ое кольцо (или больше), замаскированное более молодыми от-

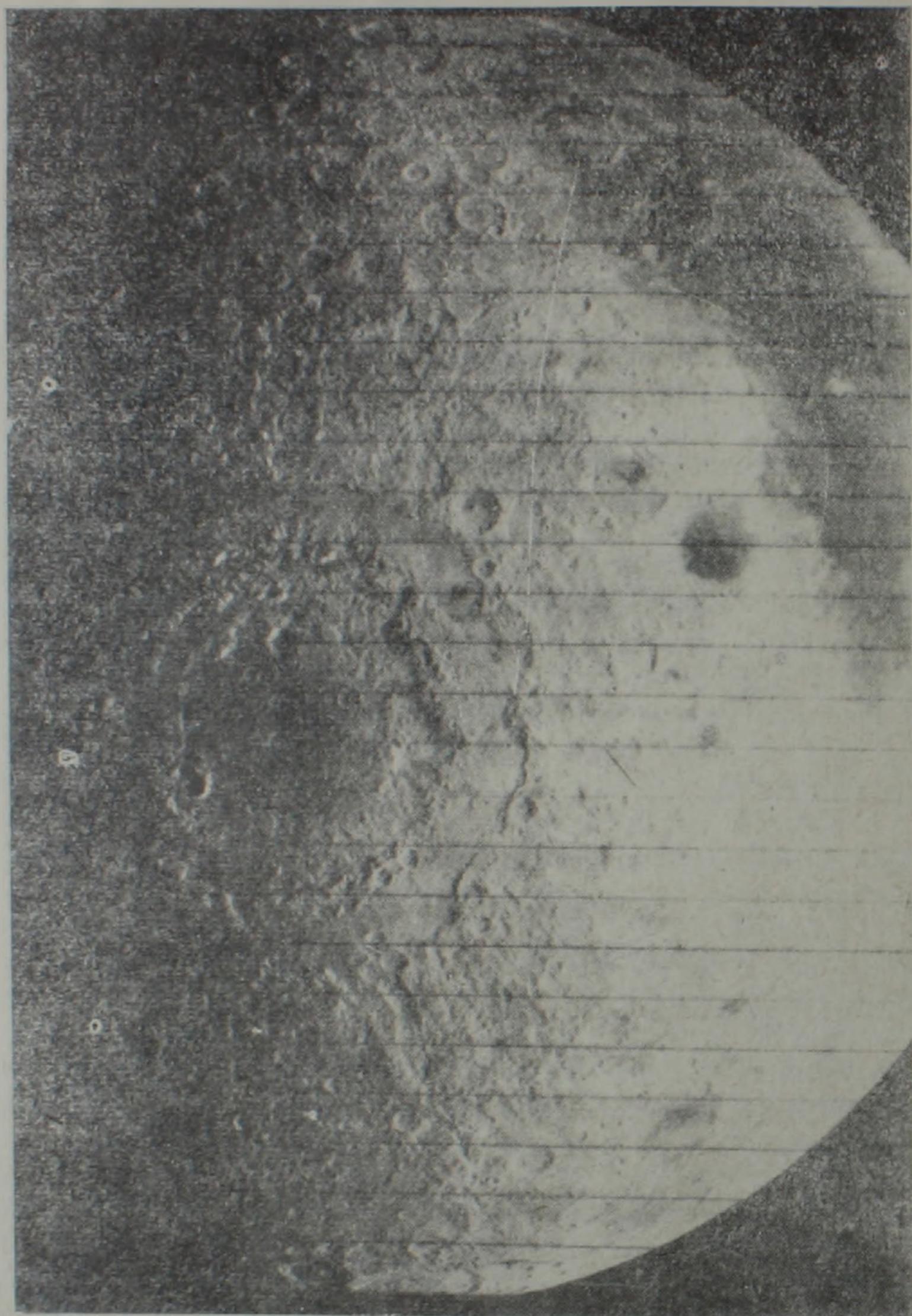


Рис. 1. Фотография со средним разрешением с «Лунар Орбитер IV» М 187, полученная 25 мая 1967 г. с высоты 2723 км. Внешнее горное кольцо—*Кордильера* имеет высоту до 3 км, диаметр 966 км и протяженность по окружности около 3048 км. Внутреннее горное кольцо—*Скопистые горы*—имеет диаметр около 644 км. Третья кольцевая структура с диаметром 450 км окружает центральную темноволнистую часть бассейна с кратерами Маундер, Копф, Хоманн. Море Восточное, по характеристике К. Бенеша и Г. Н. Каттерфельда (1967), относится к типу параталассонидов—образований, промежуточных между талассондами и типичными лунными морями. На фото сверху справа—«часть Океана Бурь с кратерами (снизу вверх) Рейнер Галилей, Галилей А, Кардан, Крафт, Селевк, и цирками Эддингтон, Струве, Рэссел, К СЗ от Рейнера—формация Рейнер-гамма. Между Морем Восточным и Океаном Бурь видны два цирка—Гримальди (с темноволнистым дном) и Риччиоли. Координаты центра снимка: 89° в. д., 15° ю. ш.

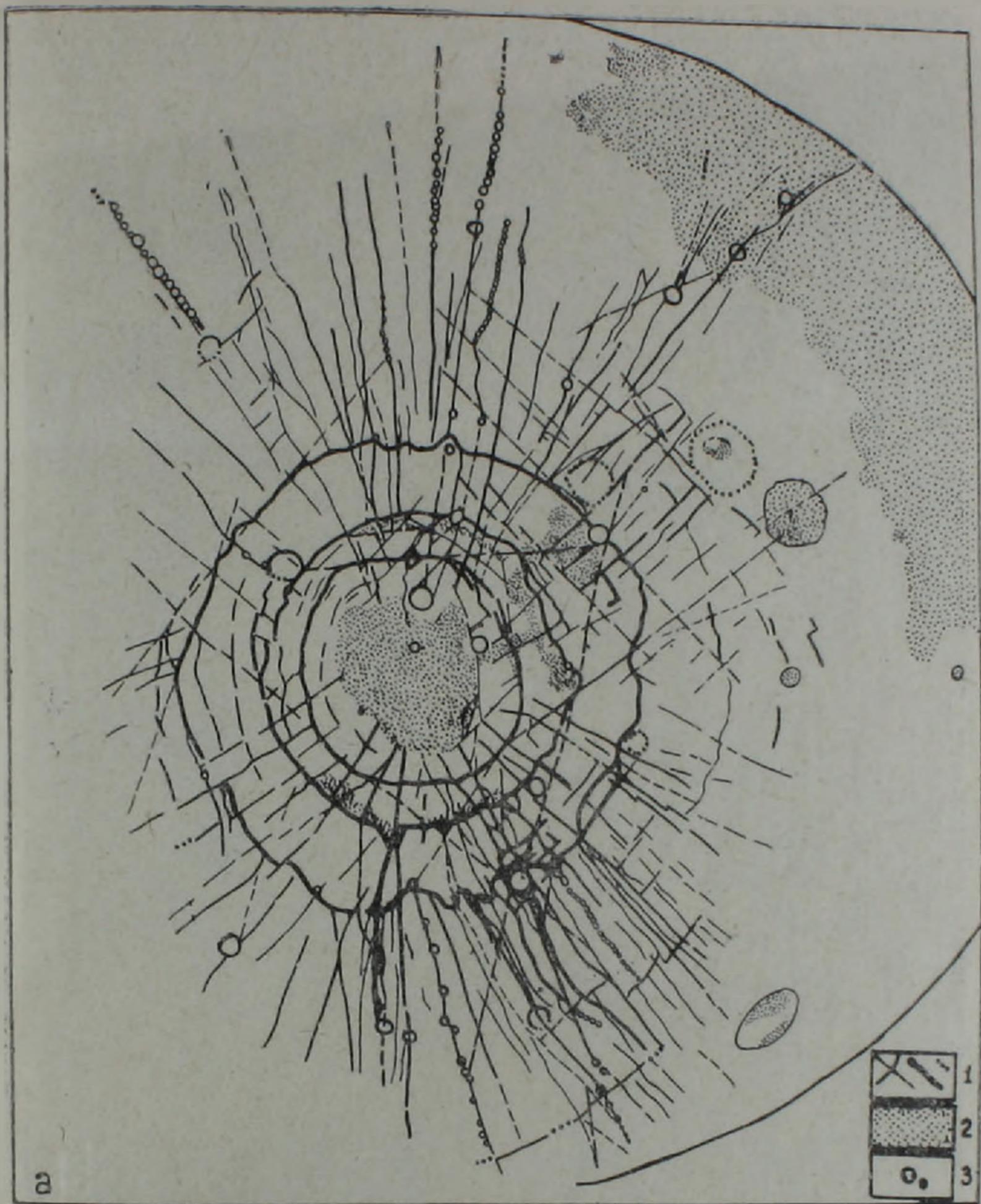


Рис. 1а. Схема радиально-концентрической структуры Моря Восточного, составленная по космическим снимкам с «Лунар Орбитер IV» М 187 (фото 1) и «Зонда З». Условные обозначения: 1—радиальные и концентрические разломы, гребни, цепочки кратеров, полигональные валы кратеров; 2—базальтовые поля; 3—некоторые примечательные кратеры.

ложениями. Если это так, то образование кольцевых структур на Марсе и Меркурии может следовать тем же самым законам, как и на Луне.

Дополнительное количественное сравнение концентрических кольцевых структур приводит к новому пониманию их пространственных соотношений. Тщательный анализ этих соотношений на Луне показывает, что расстояния между последовательными кольцами относятся между собою как $\approx \sqrt{2}$. Знание этой закономерности может помочь в

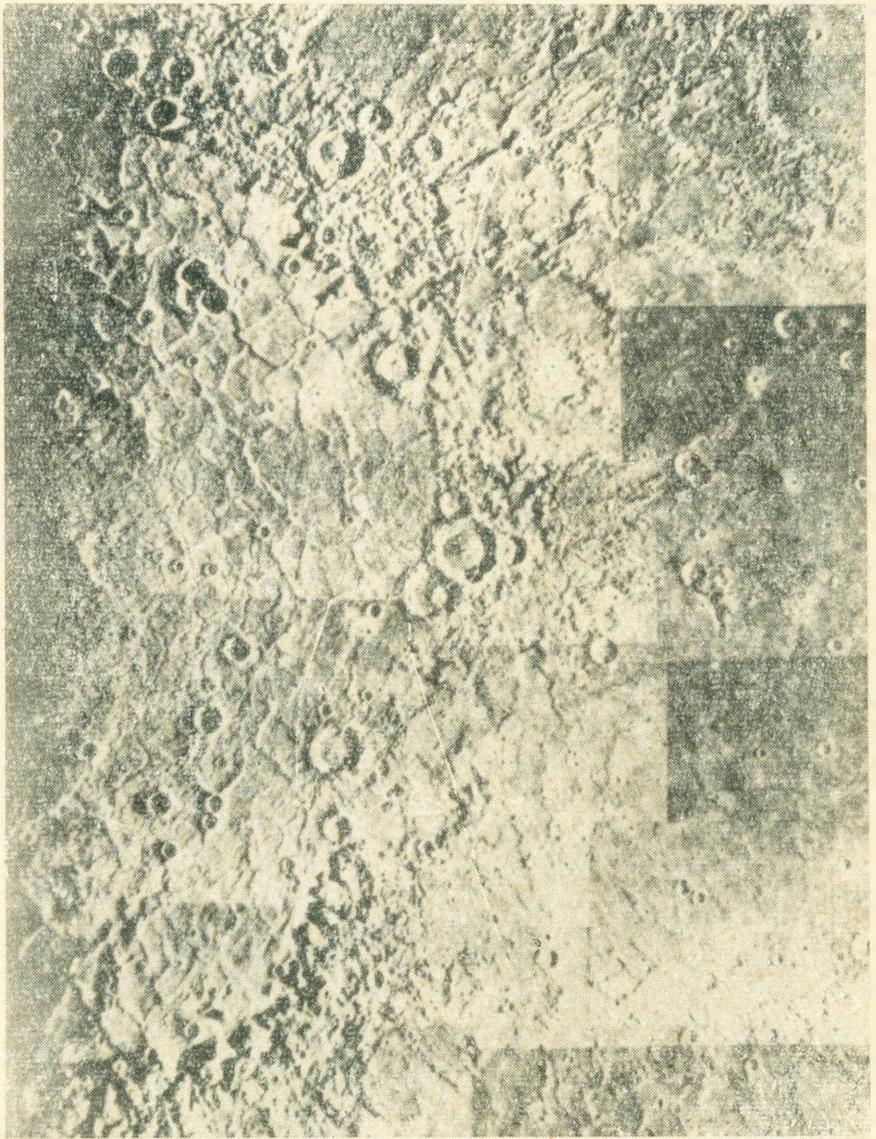


Рис. 2. Море Жары—крупнейшая радиально-концентрическая структура на Меркурии, открытая 29 марта 1974 г. «Маринером 10». Этот круговой бассейн имеет диаметр 1300 км и окружен горами высотой до 2000 метров. Внутри бассейна наблюдается концентрическая система разломов и гребней. Радиальная система наиболее развита в СВ квадранте. Координаты центра Моря Жары: 190° з. д. и 30° с. ш. Мозаика составлена из 18 фотографий с «Маринера 10».

открытии ранее нераспознанных, очень древних кольцевых структур такого типа. Чрезвычайно интересно, что этой же закономерности подчиняются как диаметры, так и расстояния между центрами кратеров, составляющих цепочки эндогенных кратеров. На Луне обнаружено уже более 50 таких кратерных цепочек [10].

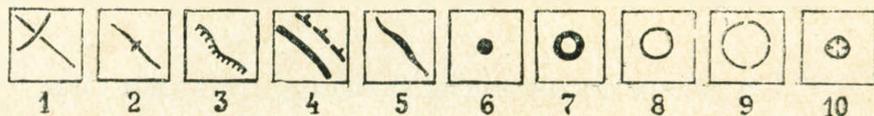
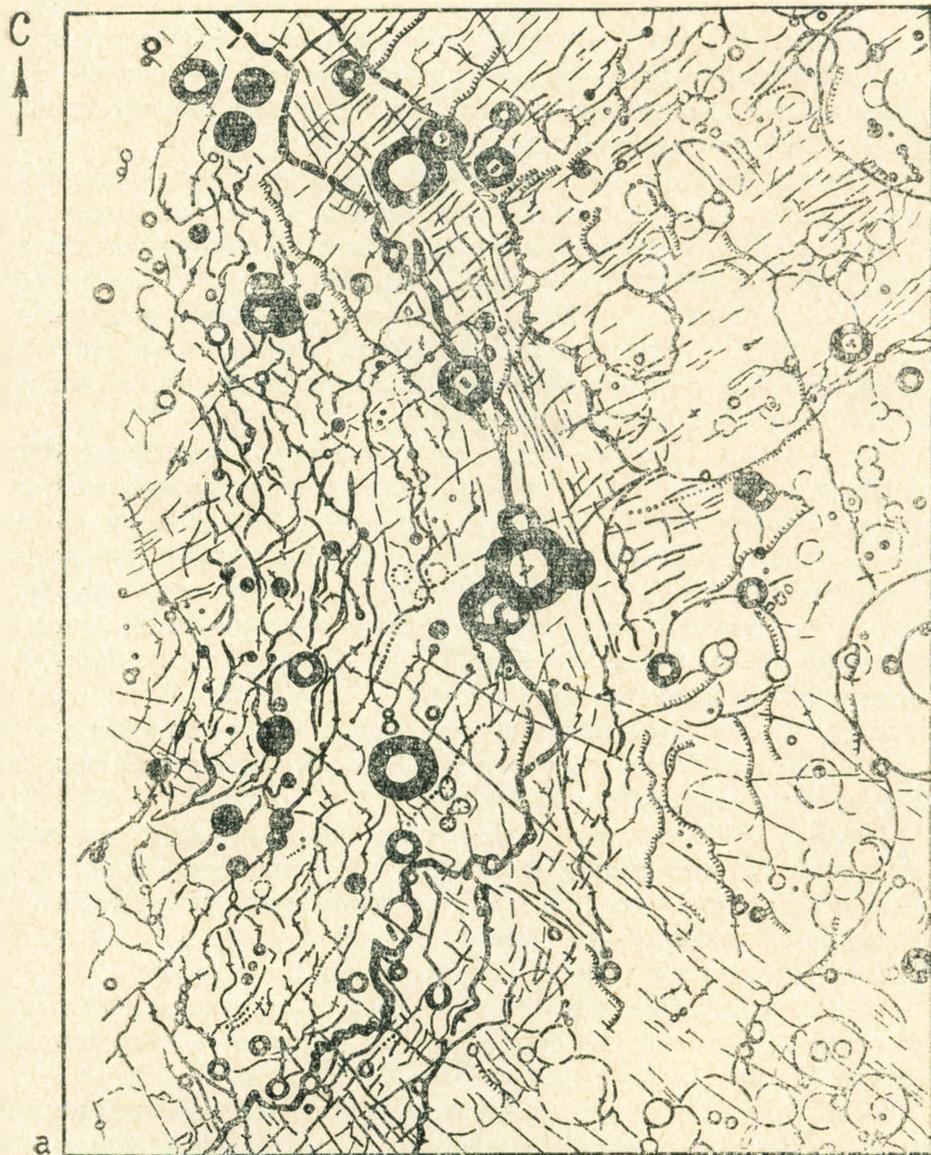


Рис. 2а. Структурно-морфологическая карта моря Жары и его восточного обрамления, составленная по фотомозаике 2. 1—Линеаменты, радиальные или концентрические к гребню бассейна; 2—гребни; 3—уступы; 4—гребень и внешний уступ *Калорисской Кордильеры*; 5—трещины шириною $\geq 3,5$ км; 6—поздние послеморские кратеры; 7—ранние послеморские кратеры; 8—поздние доморские кратеры; 9—ранние доморские кратеры; 10—провальные воронки.

Существующая типология и номенклатура лунных и планетных кратеров должна рассматриваться только как предварительная. Некоторые новые геологические критерии для выявления и различения кратеров, соответственно, вулканической или метеоритной природы были получены из анализа космических фотографий лунной поверхности, сделанных с лунных спутников [28].

Основной вывод, к которому в последние годы пришли многие авторы, состоит в том, что лунные и планетные цирки представляют собой сложные образования, развитие которых было не катастрофическим, а имело длительную историю. Имеются замечательные элементы подобия между фазовым развитием лунных, меркурианских, марсианских и земных кольцевых комплексов. Плутонизм→тектоника→вулканизм—такова логическая последовательность событий, которой не может пренебречь ни один планетный исследователь.

Сравнительно-геологический анализ эндогенных кольцевых структур Луны показывает, что они не являются такими же вулкано-структурными образованиями, которые мы знаем на Земле. Только некоторые из лунных вулканических структур могут иметь близкое подобие с вулканическими структурами современной Земли—планеты, литосфера которой уже давно прошла «лунную» фазу своего развития. Лунный и планетный вулканизм может проявляться в различных формах, соответствующих стадиям развития планетных тел [4, 15, 16].

Один из наиболее важных и дискуссионных вопросов эволюции поверхности планет—это проблема генезиса кольцевых структур типа *Моря Восточного*, *Моря Жары* и *Аргир*.

Генезис кольцевых и радиально-концентрических структур дискутируется не только в планетологии. Много внимания ему уделяется, например, в палеовулканологии, где этот вопрос приобретает к тому же практическое значение—для выявления структурного положения оруденений, связанных с вулкано-тектоническими структурами.

Известны попытки решения этого вопроса с точки зрения тангенциальных напряжений [12, 8] и взрывного эндогенного высвобождения энергии [6, 25].

Можно подойти к этой проблеме, исходя из теоретических исследований напряженного состояния и прочности пород кровли магматического очага структуры во время ее возникновения и моделирования процесса на эквивалентных материалах.

II

Механизм формирования кольцевых структур в свете механики горных пород

Нами было выполнено моделирование концентрических кольцевых структур [19]. Результаты испытаний, выраженные в средних значениях, представлены в таблице 1, где p —действующее давление, направленное от очага к поверхности, α —угол падения кольцевого разлома, D —диаметр кольцевого разлома, H —глубина очага.

Таблица 1

| p (кг/см ²) | α (°) | D (см) | H (см) | D/H |
|---------------------------|--------------|----------|----------|-------|
| 24 | 18 | 6,5 | 0,5 | 13 |
| 42 | 37 | 5,0 | 1,0 | 5 |
| 44 | 63 | 4,5 | 1,5 | 3 |

Очевидно, что с возрастанием глубины H среднее значение угла α увеличивается, а диаметр D кольцевого разлома уменьшается. Значение давления p в магматическом очаге, необходимое для разломообразования в его кровле, увеличивается с возрастанием глубины H .

При углублении магматического очага с течением времени возникает хорошо выраженная возрастная последовательность концентрических кольцевых разломов.

Указанные экспериментальные работы были проведены исправленным методом соосных пуансонов на эквивалентных материалах при близко подобном значении напряженного состояния. В качестве эквивалентных материалов использовались смесь технической резины с мелкими стеклянными шариками и гипс. Магматический очаг моделировался пластическим материалом (стеклянный шарик диаметром 0,5—1 мм внутри технической резины), который давал возможность полной передачи давления во время моделирования. Метод соосных пуансонов изложен более детально в работе Воропинова-Киттриха [29]. Механические свойства эквивалентных материалов во всех случаях были те же самые. На основе теоретико-экспериментальных результатов моделирования нами было выведено [19, стр. 25] следующее математическое выражение для вычисления вероятной глубины магматического очага H :

$$H = \frac{D}{2} \operatorname{tg} \alpha \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_{mt}}{\sigma_{mt} + p \cdot \cos \alpha}} \right), \quad (1)$$

где:

D —диаметр кольцевой структуры, а для концентрической структуры—диаметр ее центральной части (в м),

α —наклон концентрических разломов на границе центральной части (в°), σ_{mt} —среднее значение прочности на разрыв кровли (в т/м²).

В уравнение (1) может быть введено также влияние времени t , поскольку

$$\sigma_{mt} = \frac{\ln B - \ln t}{\beta}, \quad (2)$$

где B и β —параметры ползучести (получаемые при испытании на растяжение материала кровли).

Значение D может быть определено непосредственно по фотоснимкам, однако другие параметры, такие как α , p , σ_{mt} не могут быть определены с достаточной степенью точности в настоящее время.

Для определения H можно построить номограмму альтернативных решений. Точное определение H , вероятно, будет возможно в будущем.

Из результатов исследования Я. Ю. Броуля [18] следует, что типы таких пород, как базальты, анортозиты (из которых состоит лунная кора), имеют среднее значение прочности на разрыв (σ_{mt}), заключенное в пределах 100—120 кГ/см².

Ход угла α в зависимости от диаметра D можно, например, получить из работы Г. Н. Каттерфельда [5], из которой следует, что значение α может изменяться практически в пределах 10—40°. Если принять во внимание указанные пределы значений α , то тогда остается открытым вопрос о значениях p . Поэтому здесь возможен выбор лишь немногих p . В настоящее время мы можем определить только вторую его часть p_2 , определяемую давлением в кровле очага согласно выражению

$$p_2 = g_0 \rho_0 H, \quad (3)$$

где g —ускорение силы тяжести, ρ_0 —плотность пород в кровле ($\rho_0 \approx 3.0 \text{ г/см}^3$), H —данная глубина.

В случае Луны, если слагаемое p_2 определяется из уравнения (3) (для различных H), мы получаем зависимость, представленную на рис. 3 прямой линией, проходящей через начало координат.

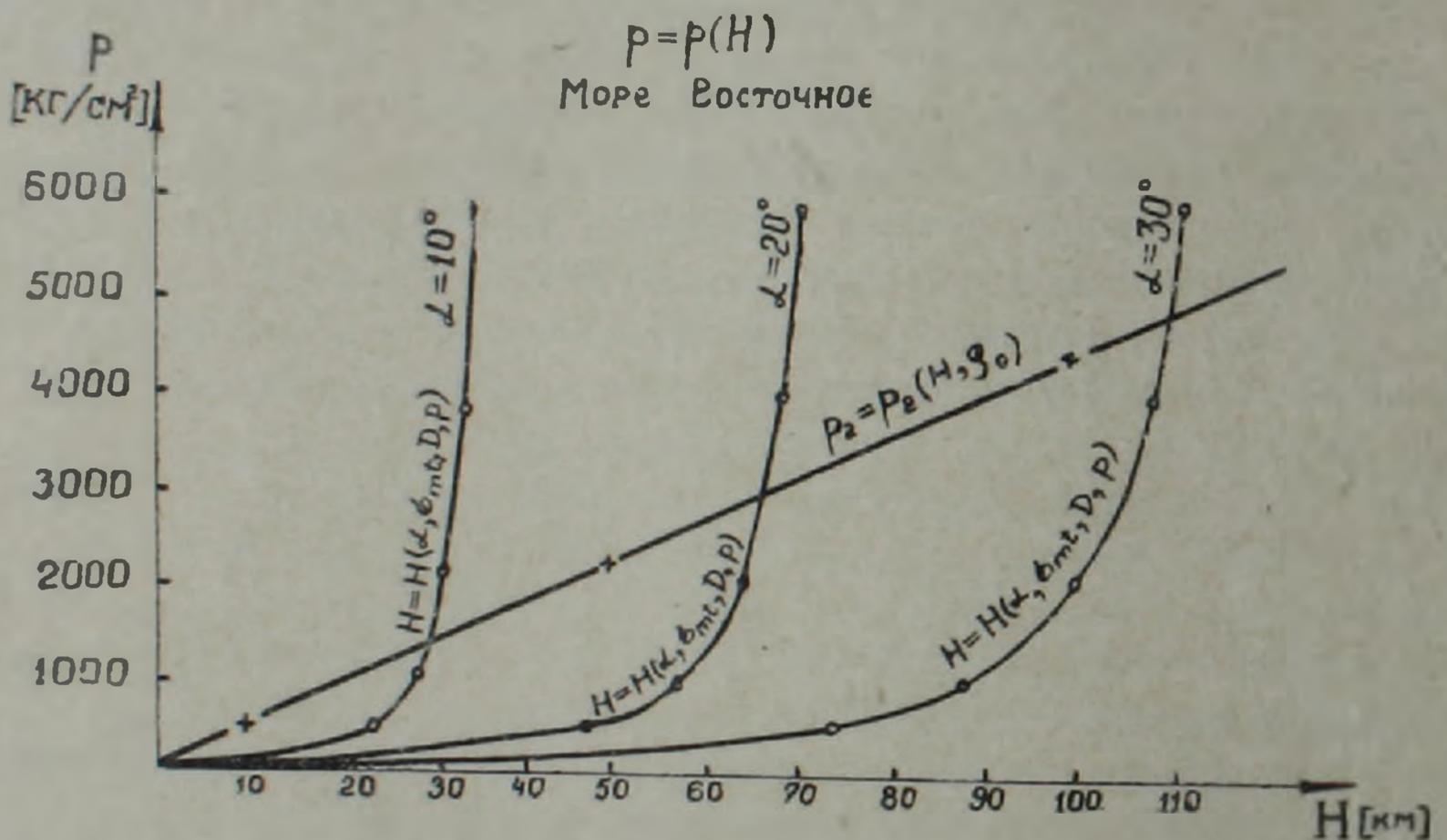


Рис. 3. Номограмма для определения глубины заложения очага в случае Моря Восточного.

Исходя из вышеуказанных параметров и беря значения $p \approx 1000, 2000, 3000, 4000$ ат при постоянной величине α , можно получить различные значения H . Точка пересечения обеих кривых даст нам как вероятную глубину очага H , так и вероятное давление в очаге в момент потери устойчивости (см. рис. 3).

Для приблизительного определения величины можно воспользоваться выражением из работы Г. Н. Каттерфельда [5]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{4 \varepsilon_{mc}}{D \rho g}, \quad (4)$$

где ε_{mc} — сопротивление породы ее раздавливанию, ρ — плотность породы.

Предполагая, что породой является базальт ($\varepsilon_{mc} = 3130 \text{ кг/см}^2$, $\rho \approx 3,0 \text{ г/см}^3$), в случае *Моря Восточного* ($D = 450 \text{ км}$, $g = 162 \text{ см/сек}^2$) имеем $\operatorname{tg} \alpha = 0,560$ и $\alpha = 29^\circ,4$.

Из уравнения (1) и номограммы 3 следует, что $p = 4700 \text{ ат}$ и $H \approx 106 \text{ км}$.

Полученная оценка удовлетворительно согласуется с результатами Е. Д. Сынгаевского [8].

В случае *Моря Жары* ($D \approx 1300 \text{ км}$) на Меркурии ($g \approx 300 \text{ см/сек}^2$) имеем $\alpha \approx 6^\circ,1$ и $H \approx 40 \text{ км}$.

Для *Аргиры* ($D \approx 1000 \text{ км}$) на Марсе ($g = 372 \text{ см/сек}^2$) $\alpha \approx 6^\circ,3$ и $H \approx 32 \text{ км}$.

Полученные оценки, конечно, приближительны, но они представляют определенный интерес, поскольку даже на Земле из-за отсутствия более точных способов глубины очагов эндогенных кольцевых структур оцениваются пока сугубо предположительно.

Опыт моделирования свидетельствует о возможности возникновения кольцевых структур в результате изменения очагового давления на глубине.

Определенная активность внешних сил [30], однако, также может быть признана, но не в качестве решающего фактора. Представление об ударном формировании концентрических разломов и гребней в таких больших и сложных кольцевых структурах, как *Море Восточное* на Луне, *Море Жары* на Меркурии и *Аргиры* на Марсе — представляется менее вероятным.

III

Пространственные деформации в горных породах, вызванные внешними силами

Механика горных пород позволяет исследовать деформационную способность породы, выражая ее коэффициентом относительной пластичности, и величину сопротивления породы вдавливанию ε_{mc} , учитывая влияние температуры, геостатическое состояние напряженности, разрывы в горном массиве и другие факторы. Так, например, выяснено, что с нарастанием температуры происходит понижение сопротивления породы и повышение ее пластичности.

При наших опытах скорость напряжения $\dot{\varepsilon}_{mc}$ равнялась скорости движения вдавливаемого штампа (стальной шарик диаметром 3 мм).

Испытания пород на вдавливание, наблюдение возникающих систем разрывов и поверхностей ослабления и измерение деформаций в вертикальном и горизонтальном направлениях были осуществлены для базальта, известняка, песчаника, аргиллита, алевролита и каменной соли.

Последняя позволяет вести визуальное наблюдение пространственных систем поверхностей ослабления, возникающих при вдавливании, тогда как для непрозрачных материалов (песчаник, известняк, аргиллит и др.) наблюдение поверхностей ослабления осуществлялось только на аншлифах образцов или на поперечной плоскости излома.

В случае хрупких непластических материалов в окрестностях вдавливания возникает система лучеобразных радиальных трещин—так называемая радиальная система— R (рис. 4а). Длина радиальных трещин варьирует в зависимости от величины приложенной вертикальной силы и характера испытываемого материала.

В пластичных материалах (например, в аргиллите), принимая во внимание их деформационное течение, радиальная система не возникает. В этом случае, после достижения предела упругости, на некоторой глубине под точкой приложения силы возникает система расходящихся трещин, ориентированных как бы по поверхностям усеченных конусов (рис. 4 б, в)—так называемая *внутренняя конусная система* поверхностей ослабления— S . Глубина и угол падения этих трещин являются функцией структурных, физико-механических и химических свойств испытываемого материала, его бещественного и петрографического состава, напряженного состояния, а также предшествующей геологической истории данной породы (массива).

За счет бокового давления в породе возникают также трещины, дугообразные по отношению к поверхности—так называемая боковая или *латеральная система* (см. рис. 4 б, в).

Кроме этих двух систем у кристалла каменной соли возникают еще разрывы по спайности—кристаллографически ориентированным минимумам связности (см. рис. 4 б).

Приводит ли действующее поле напряжений только к скольжению материала по системе латеральных трещин или к полному отрыву (вдоль латеральных, может быть и радиальных трещин)—это зависит от величины действующей силы, состава и физических свойств породы. У кристалла каменной соли латеральные системы трещины приблизительно определены глубиной области дробления (см. рис. 4). Внутренние конусные системы, наоборот, в несколько раз глубже, чем бассейн дробления. В случае песчаника глубина расходящихся трещин была в десять раз больше, чем диаметр кратера. В аргиллите при одинаковых условиях вдавливания не возникали ни радиальные, ни видимые латеральные системы ослабления.

Картина пространственных деформаций, наблюдаемая на кристалле $NaCl$ (частично также и в случае известняка) в некоторых отношениях хорошо сравнима со строением микрократеров на лунных стеклянных шариках. На фото 5 в окрестностях лунных микрократеров хорошо заметны чашечные отрывы, а именно вдоль латеральных поверхностей ослабления (ср. с разрезом кристалла $NaCl$, рис. 4) и вдоль лучеобразных трещин. Из этого сравнения следует, что разрушение, вызванное

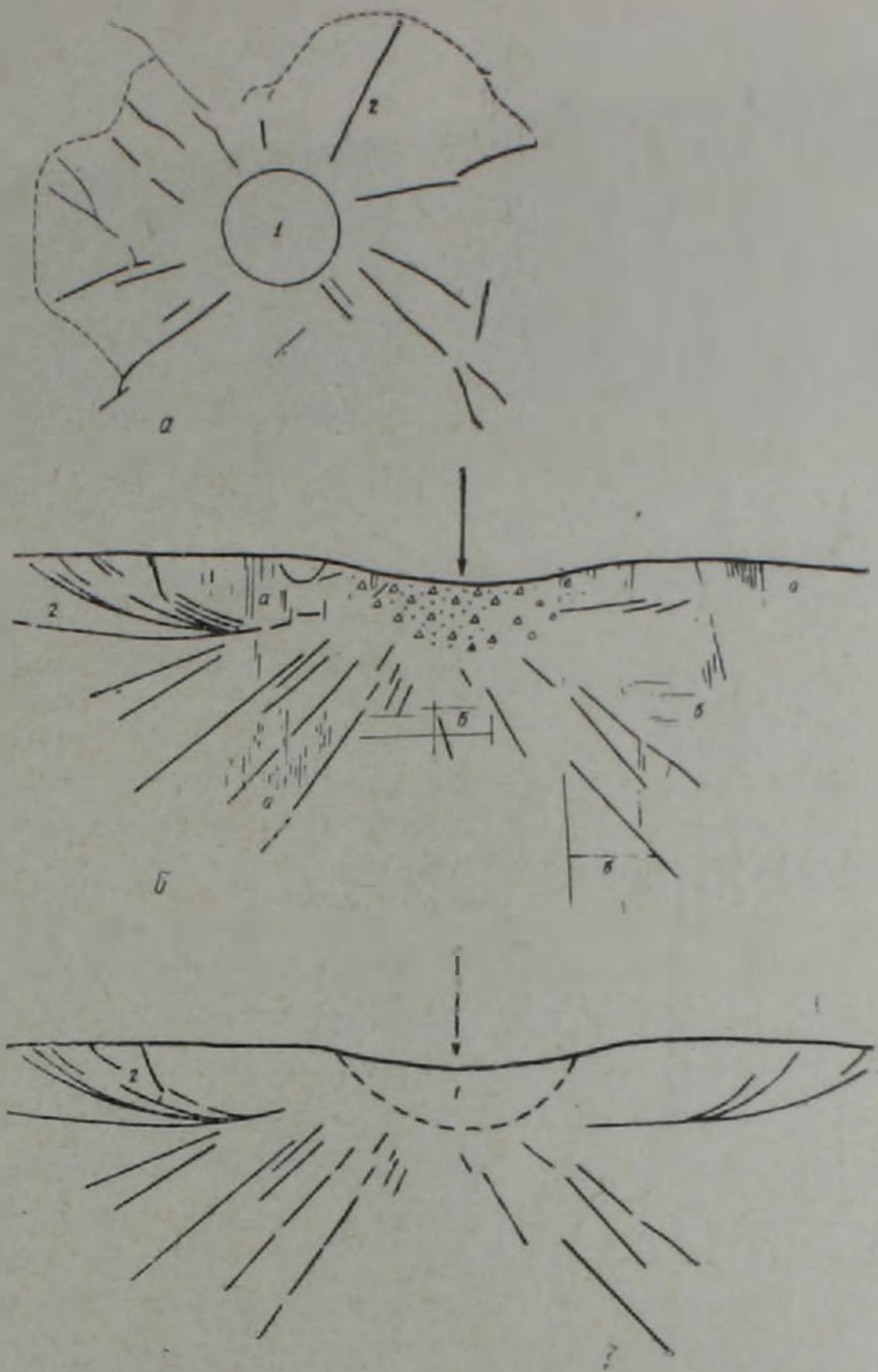


Рис. 4. (а). Радиальная система трещин на поверхности кристалла каменной соли. NaCl. 1—пенетрационный кратер, 2—элемент радиальной системы, 3—граница возможного отрыва. (б) Картина деформаций в кристалле NaCl при действии вертикальной внешней силы. 1—внутренняя конусная система, 2—латеральная дугообразная система; а, б—плоскости сцепления (кристалл соли NaCl имеет кубическую систему). (в) То же самое, что на рис. 4б—упрощено. 1—зона дробления, 2—отрывы, возникающие по боковым дугообразным поверхностям латеральной системы (ср. с лунными микрократерами на фото 5).

ударом частиц большой скорости, отвечает, по крайней мере в общих чертах, деформациям, получаемым при опытах вдавливания в лабораторных условиях.

Хотя эти опыты и показывают различные реакции испытываемых пород в зависимости от их состава и физических свойств, однако мы полагаем, что некоторые индуцированные величины возможно привести к общему знаменателю. Во всяком случае пенетрационное напряжение у хрупких материалов в поле его действия ведет к возникновению:



Рис. 5. Радиально-концентрические системы (RC) в окрестностях лунных микрократеров (ср. с рис. 4).

1. радиальной системы трещин;
2. латеральной системы;
3. внутренней конусной системы;
4. области дробления, имеющей чашечную форму, когда вдавливающим элементом является шарик.

Не ясно, в какой именно мере пространственную картину деформаций, полученную на основании пенетрационного метода, можно сравнить с картиной, вызванной космическими ударами о планетную поверхность. Но в принципе допустимо, что и в связи с ними возникает глубокое структурное разрушение массива и одновременно—по крайней мере в общих чертах—аналогичная структурно-деформационная картина, наблюдаемая в лабораторных условиях.

Некоторые авторы (например, У. Хартманн, Ф. Герц, Н. Шорт, Л. Ронка и др.) объясняют возникновение лунных круговых морей на основе гипотезы о вулканической деятельности, вызванной космическим ударом (*impact-induced volcanism* [21, 22]). По их мнению, чужой космический объект в результате своего падения сначала образовал чашечный бассейн и в то же время сильно разрушил окружающую область. В следующей затем вулканической фазе возникали интрузии и экструзии—в соответствии с уже оформленными системами поверхностей ослабления или понижения прочности. Если представления этих авторов—импактистов и исходят из одинаковой рабочей гипотезы, то рисуемые ими модели не одинаковы и не согласуются между собою (рис. 6 а и 6 б). В их интерпретации имеется еще ряд неясностей и это свидетельствует о том, что генетическое рассмотрение ударных кольцевых структур является до сих пор сложной проблемой.

* * *

Если направление действия вертикальной силы обратное, т. е. снизу вверх (например, в планетной коре или ее слое), то в этом случае возникает зеркальное структурно-деформационное изображение. Если

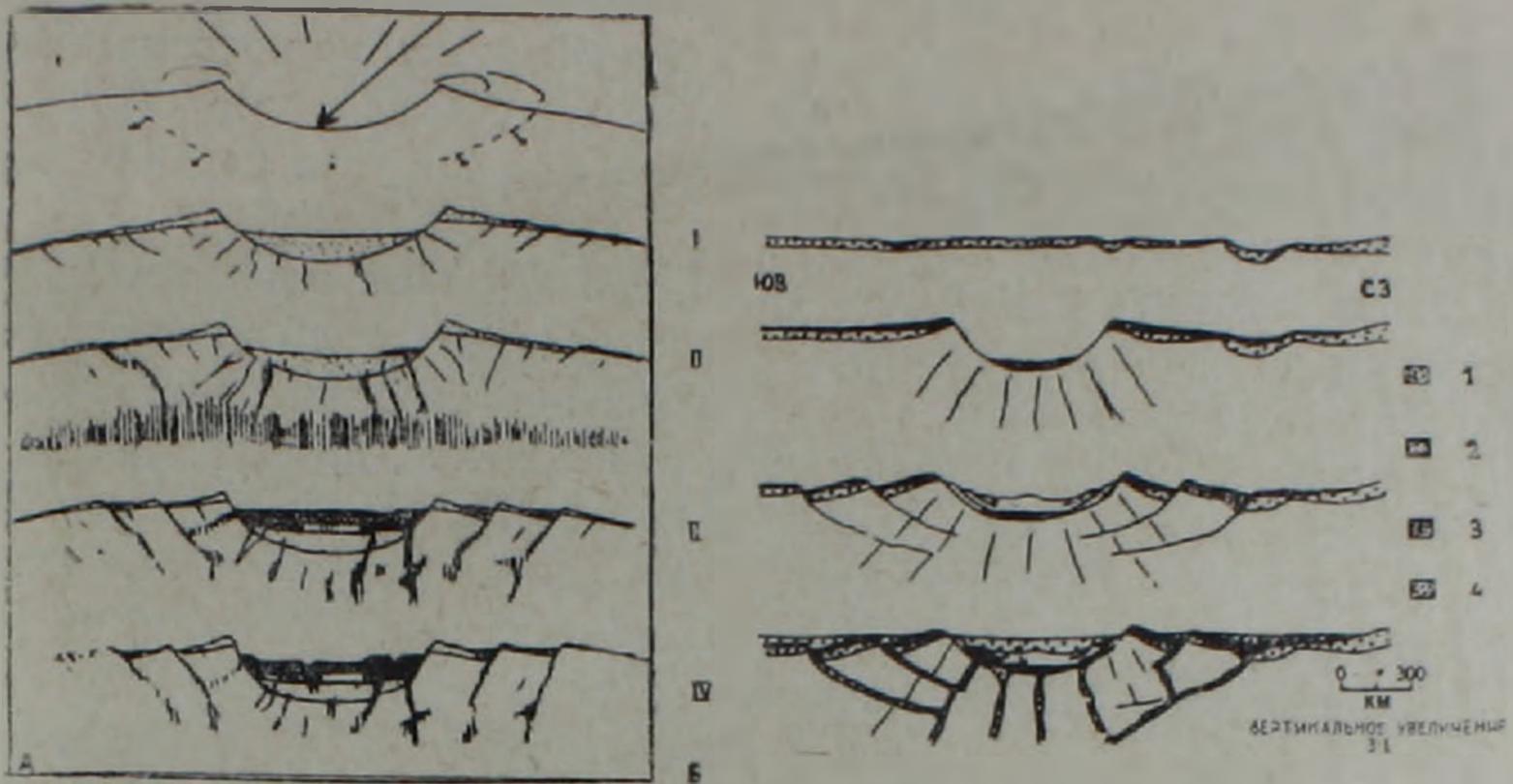


Рис. 6. (а). Образование Моря Восточного и круговых лунных морей по гипотезе Хартманна-Иэла (1969). Стадии I и II не согласуются с картиной пространственной деформации, полученной при пенетрационных испытаниях. (б) Образование круговых лунных морей по гипотезе Шорта-Формэна (1972). Ср. последние три стадии с системами разрывов на рис. 4. Возникновение стадии III не ясно. 1—морские лавы, 2—каменная мука в бассейне, 3—выбросы в бассейне, 4—коровые выбросы. (Вертикальный масштаб увеличен в три раза).

очаг напряжения находится в коре планеты и действует снизу вверх, то конусные системы поверхностей ослабления будут проектироваться по направлению к поверхности (или они появляются после эрозии), в форме кольцевых систем разломов, жил, вулканических валов и т. п. (концентрические системы—С (см. рис. 1 и 2). При уменьшении объема интродуцирующей массы по этим системам происходит обрушение поверхности, приводящее к образованию отрицательных форм рельефа. В некоторых случаях наряду с кольцевыми системами обнаруживаются также и радиальные (см. рис. 1 и 2). Интересные примеры таких систем встречаются среди эродированных позднепалеозойских вулканотектонических структур Центрального Казахстана, палеозойских кольцевых комплексов Восточной Австралии, Шотландии и Ирландии, докембрийских кольцевых комплексов и вулканотектонических структур Украины (Коростенская кольцевая структура среднепротерозойского возраста с диаметром 130 км). Южной Австралии и Канады, докембрийских купольных структур Южной Африки и в других районах нашей планеты.

IV

Заключение

1. Рассмотрение задачи, поставленной в разделе II, позволило вывести зависимость между диаметром центральной части эндогенной (вулканогенно-тектонической) кольцевой структуры, глубиной залегания ее магматического очага и углом падения ее концентрических разломов, а также учесть влияние времени.

2. По мнению Р. Болдуина [13], диаметр структуры прямо пропорционален углу падения этих разломов. Однако опыты по моделированию возникновения кольцевых структур показали, что диаметр структуры с увеличением ее глубины уменьшается, тогда как угол падения кольцевых разломов возрастает.

3. Из результатов 1) и 2) следует, что круговые моря, концентрические структуры и горные цирки разного размера должны иметь различную глубину заложения, а также различный относительный возраст. Так, например, лунное *Море Дождей*, по-видимому, древнее, чем *Море Восточное*, а марсианская *Эллада* должна быть старше, чем *Аргира*. Это предположение подтверждается косвенными (структурно-морфологическими), а в случае Луны—и прямыми данными.

Таким образом, старое селенологическое правило относительно диаметра, возраста и высоты вала кольцевых структур: «меньше—моложе—ниже» уточняется и дополняется следующим образом: «моложе—глубже (H)—меньше—круче (α)—ниже», где H —глубина магматического очага, α —угол падения кольцевых разломов.

4. Опыты по моделированию показывают, что: а) при большой мощности пород центральной части моря, и при действии растягивающих напряжений, на его поверхности возникают разрывы и трещины, а при б) относительно небольшой их мощности и при действии боковых сжимающих напряжений, на поверхности моря образуются валы.

5. Моделирование формирования кольцевых структур внутренними и внешними силами показало, что: а) в направлении к поверхности возникают системы конических (кольцевых в плане) трещин с разными углами падения, образующие на поверхности концентрические системы; б) анизотропия материала над очагом, вертикальные движения (опускания) и изменение характера трения по трещинам нарушают симметрию их систем; в) с увеличением глубины залегания очага (при постоянном давлении в нем) площадь распространения трещин на поверхности уменьшается, а угол падения возрастает.

6. Поскольку концентрические структуры могут возникать при действии как внутренних, так и внешних сил, то наличие концентрических колец у кратеров не может служить безусловным критерием их эндогенного образования. Однако в случае больших горных цирков, круговых морей и кольцевых структур типа *Моря Восточного*, *Моря Жары* и *Аргир*, имеющих длительное, многофазное развитие, эндогенный механизм их формирования представляется более вероятным, чем ударно-метеоритный.

Авторы признательны К. Бенешу, О. П. Гуюмджяну, Г. А. Иваняну, Ю. А. Косыгину, М. П. Лысенко, Г. В. Лучацкому и В. А. Соловьеву за обсуждение полученных результатов.

Остревский Горный институт, ЧССР,
Лешинградский Государственный университет

Поступила 20.I.1967.

ՕՂԱԿԱԶՆԵՎ ԵՎ ՇԱՌԱՎՂԱՏՈՒՆ-ՆԱՄԱԿԵՆՏՐՈՆ
ՍՏՐՈՒՆՏՈՒՐԱՆԵՐԻ ՆՈՂՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Մոլորակների մակերևույթների զարգացման ամենակարևոր խնդիրներից մեկը օղակաձև ստրուկտուրաների ծագման հարցն է, մասնավորապես, Արեւելյան ծովինը՝ Լուսնի վրա, Տադի ծովինը՝ Մերկուրիի վրա և Արգիրայի ծովի տիպինը՝ Մարսի վրա: Մագմատիկ օջախի հավանական խորության որոշումը արժեքավոր չափանիշ կարող է հանդիսանալ նման ստրուկտուրաների ծագման պարզաբանման համար: Հեղինակները մագմատիկ օջախների հավանական խորության գնահատման համար կատարել են փորձնական մոդելացում և կազմել արտերնատիվ լուծումների նոմոգրամ:

Օղակաձև ստրուկտուրաների առաջացումը ներքին և արտաքին ուժերի ազդեցության տակ ցույց տվեց, որ ա) լարման մեծ արագության դեպքում օջախի շուրջն առաջանում է խախտումների դոնա, բ) մակերևույթի ուղղությամբ առաջանում են օղակաձև ձեղքերի սիստեմներ, որոնք մակերևույթի վրա ստեղծում են համակենտրոն սիստեմներ, գ) այս ձեղքերի տարածման սահմանը մակերևույթի վրա ներքին շփման ֆունկցիա է, դ) օջախի վրա գտնվող նյութի անիզոտրոպիան, ուղղաձիգ շարժումները (իջեցումները) և ձեղքերի շփման բնույթի փոփոխությունները խախտում են նրանց սիստեմների համաչափությունը, ե) օջախի տեղադրման խորության աճի հետ (հաստատուն ճնշման դեպքում) ձեղքերի տարածման սահմանները մակերևույթի վրա փոքրանում են, իսկ անկման անկյունը՝ մեծանում:

Քանի որ համակենտրոն ստրուկտուրաներ կարող են առաջանալ ինչպես ներքին, այնպես էլ արտաքին ուժերի ազդեցության ներքո, ապա խառնարանների համակենտրոն օղակների առկայությունը նրանց ներքին ծագման պարտադիր չափանիշ չի կարող դառնալ: Սակայն լեռնային մեծ կրկեսների, շրջանաձև ծովերի և օղակաձև ստրուկտուրաների դեպքում (Արևելյան ծովի, Տադի ծովի, Արգիրայի տիպի, որոնք ունեն հրկարատե, բազմաֆազ զարգացում) ծագման ներքին մեխանիզմն ավելի հավանական է, քան հարվածային-մեխոորիայինը:

J. J. BROUL and G. N. KATTERFELD

GENESIS OF RING AND RADIAL-CONCENTRIC STRUCTURES

A b s t r a c t

One of the most important problems related to the development of a planet's surface is the origin of ring structures, specifically the types represented by the Mare Orientale on the Moon, the Caloris Basin on Mercury and the Argyre on Mars. A determination of the probable depth to the magma chamber could be a valuable criterion in discovering the mode of genesis of such structures. Theoretical-experimental methods in

rock mechanics can be used successfully in making such determinations. Experimental modeling of the formation of such structures has been conducted by the authors: mathematical expressions were derived to estimate their probable depth; and a nomograph of alternative solutions was compiled. The calculated depth for Mare Orientale, based on the assumption of its endogenic nature, is equal to ≈ 100 km, which is in accordance with, for example, the estimate of E. D. Syngayevsky (1965).

The old selenological rule regarding the diameter, age and rim height of craters: that is, "smaller—younger—lower", is more clearly defined and complemented in the following manner: "younger—deeper (H)—smaller—steeper (α)—lower", where H is the depth of the magma chamber and α is the dip angle inward of the ring fracture.

A modeling of ring structure formation, considering internal and external forces, showed that: (1) systems of ring joints appear in the direction toward the surface, (2) anisotropy of material in successive beds, vertical movements (subsidence), and changes in the coefficient of friction along the joints contribute to upsetting the symmetry of ring joint systems, and (3) with increase in depth of the layer where fracture begins (at a given constant pressure) there is a decrease in the area of joint diffusion at the surface, and the dip angle of the joints increases.

To the extent that concentric structures can appear in response to both internal and external forces, the presence of concentric rings in craters cannot serve as an unconditional criterion of their endogenic origin.

In cases of large cirques, however, and the round maria and ring structures of the Mare Orientale, Caloris Basin and Argyre type, which have undergone a long, multiphase development, endogenic mechanisms of formation are more probable than those of an impact-meteorite nature.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев А. В. О кольцевых структурах магматических комплексов. Советская геология, № 10, 1965.
2. Абдулин А. А., Авдеев А. В., Абдрахманов К. А., Скублов Г. Т. Оrogenные центрально-кольцевые тектоно-магматические структуры Казахстана.—«Тектоника и магматизм орогенного и платформенного этапов развития» (Труды Института геол. наук АН Каз. ССР, т. 32), Алма-Ата, 1973.
3. Авдеев А. В. К проблеме генезиса и развития континентальных кор планет земной группы.—Известия АН Каз. ССР, сер. геол., № 6, 1974.
4. Бенеш К., Галибина И. В., Каттерфельд Г. Н. Тенденции развития планет земной группы.—Известия АН СССР, сер. геол., № 5, 1975.
5. Каттерфельд Г. Н. Морфогенезис кольцевых структур Луны: статистический и сравнительно-геологический анализ.— "Problems of Planetology", vol. 1, Ostrava 1967.
6. Петров А. И. О механизме образования структур центрального типа. Советская геология, № 10, 1968.
7. Полова Г. З. Кольцевые и линейные морфоструктуры Казахской складчатой страны, «Наука», Алма-Ата, 1966.

8. *Сингеевский Е. Д.* О структурном изучении некоторых цирков Моря Дождей и Океана Бурь на Луне. (Тезисы доклада). V Совещание по проблемам планетологии, Ленинград, 1965.
9. *Томсон И. Н., Ходик Ю. А., Хорошилов Л. В.* О лунных и земных кольцевых структурах. V Совещание по проблемам планетологии, Ленинград, 1965.
10. *Шемякин М. М.* Геометрические закономерности в цепочках некоторых лунных кратеров. V Совещание по проблемам планетологии, Ленинград, 1965.
11. *Штейнберг Г. С.* Сравнительная морфология кратеров и цирков Луны и некоторых вулканических образований Камчатки. V Совещание по проблемам планетологии, Ленинград, 1965; Известия АН СССР, сер. геол., № 10, 1965.
13. *Anderson E. M.* The dynamics of the formation of cone sheets, ring dikes and cauldron subsidence.—*Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, 1936, vol. 56, pt. 2.
13. *Baldwin R.* Lunar mascons: another interpretation. *Science*, 1968, vol. 162, № 3860, pp. 1407—1408.
14. *Benes K.* Main morphostructural types of circular lunar basins. "Problems of Planetology", vol. 1, pp. 197—199. Ostrava, 1967.
15. *Benes K., Katterfeld G. N.* On the comparative geology of planets and the term Planetology.—"Problems of Planetology", vol. 1, pp. 69—94, Ostrava, 1967.
16. *Benes K., Katterfeld G. N.* Erde, Mond und Mars im Licht der vergleichenden Planetologie.—*Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, Jg. 1, № 4, Ss. 381—401. Berlin, 1973.
17. *Broul J. J.* "The field rapid methods by KPL for the determination of the technical characteristics of rock in situ". (PhD Theses). Vysoká škola báňská v Ostravě, Ostrava, 1968.
18. *Broul J. J.* Aplikace mechaniky hornin v planetologii (výzk. zpráva úkolu F-39). Vysoká škola báňská v Ostravě, Ostrava, 1971.
19. *Broul J. J., Das B., Katterfeld G. N.* Genesis of the ring structures on the Moon's surface (from a rock mechanics point of view).—"Internat. Symposium on Physics, Chemistry and Shape of the Moon. Abstracts of papers". Moscow August, 1971.
20. *Fielder G.* "Lunar Geology". London, Lutterworth Press, 1965.
21. *Hartmann W. K. and Yale F. G.* Mare Orientale and its intriguing basin.—*Sky and Telescope*, 1969, vol. 37, № 1, 1969.
22. *Hörz F.*, editor. Meteorite impact and volcanism.—*J. Geophys. Res.*, August, 1971, vol. 76, № 23, pp. 5381—5797.
23. *Leonardi P.* "On the Origin of the Lunar Craters". (Memorie Geopaleont. dell. Università di Ferrara", vol. 2, № 1). 133 pp. Ferrara, 1967.
24. *Leonardi P.* "Vulcani e bolidi sulla Luna e su Marte". 435 pp. Galliano (Trento), 1971.
25. *Petrov A. I., Plotnikov L. M. and Yurevich G. G.* Formation mechanism of magmatic structures of central type.—*Geology Review*, April 1972, vol. 14, № 3, pp. 311—318, Washington.
26. *Pike R. J.* "Meteoritic origin and consequent endogenic modification of large lunar craters—a study in analytical geomorphology". 404 pp. U. S. Geological Survey, 1958.
27. *Pike R. J.* Geometric similitude of lunar and terrestrial craters.—Internat. Geol. Congress, XXIV Session, Section 15—Planetology, pp. 41—47, Montreal, 1972.
28. *Seeger C. R.* A geological criterion applied to Lunar Orbiter V photographs.—*Modern Geology*. June 1970, vol. 1, № 3, pp. 203—210, New York—London—Paris.
29. *Voropnov J., Klitrich R.* "Mechanika hornin", 1, str. 173—197. Praha, 1966.
30. *Wise D. V., Yates M. T.* Mascons as structural relief on a lunar "Moho".—*J. Geophys. Res.*, 1970, vol. 75, № 2, pp. 261—268.