

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XIII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

1

МОСКВА · 1975

УДК 550.81:523.43

К. П. Флоренский, А. Т. Базилевский, Р. О. Кузьмин,
И. М. Чёрная

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
НЕКОТОРЫХ ФОТОГРАФИЙ МАРСИАНСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ,
ПОЛУЧЕННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ
«МАРС-4» И «МАРС-5»

В феврале 1974 г. советские космические аппараты «Марс-4» и «Марс-5» передали на Землю изображения марсианской поверхности в районе Эритрейского моря к юго-востоку от рифтовой системы Копрат. Были получены фототелевизионные изображения двух видов — обзорные снимки с формальным разрешением порядка $0,5 \div 1,0$ км и крупномасштабные снимки с разрешением порядка 100 м. В настоящем сообщении рассматриваются результаты анализа изображений лишь части сфотографированной территории — в районе размером приблизительно 700×900 км² между кратером Холден¹ и северным обрамлением кольцевой структуры Аргир. При анализе учитывались имевшиеся в нашем распоряжении отдельные снимки этого района, полученные космическим аппаратом «Маринер-9» и составленные по ним фотокарты.

Исследованная область представляет собой одну из депрессий Эритрейского моря с высотными отметками поверхности около нулевого условного уровня (см. рис. 1). Поверхность этой депрессии испещрена кратерами диаметром до 100–150 км (см. рис. 2, а–в, 3). Для южной части района характерен останцовый рельеф вала кратерной структуры Аргир. На фоне кратерного рельефа вы-

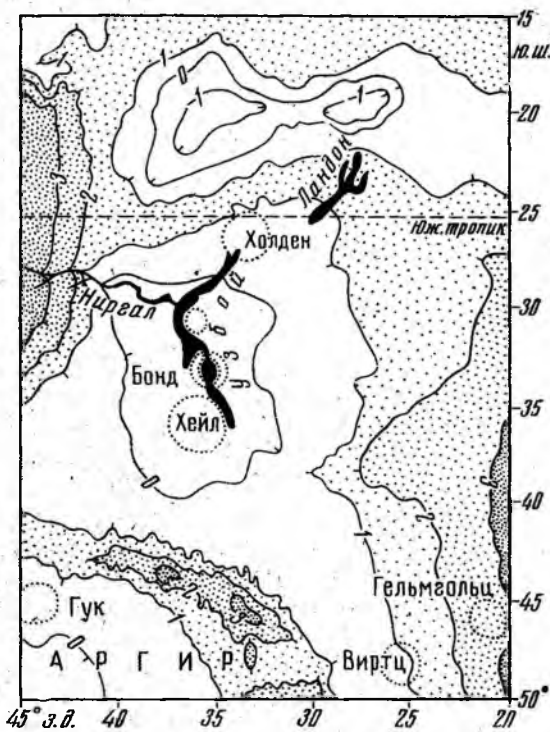


Рис. 1. Гипсометрическая схема района исследований и прилегающих территорий (по данным [1])

¹ Здесь и далее для удобства сопоставления с результатами экспериментов на аппаратах серии «Маринер» используются названия кратеров, взятые с американских топографических карт Марса масштаба 1 : 5 000 000 [1].





Рис. 2. Обзорный снимок района исследований, полученный автоматической станцией «Марс-5» 23.II 1974 г.

Белыми контурами показаны границы детальных снимков. Площадь примерно $600 \times 730 \text{ км}^2$. б — детальный снимок части вала кратера Хейл, полученный автоматической станцией «Марс-5» 17.II 1974 г. Площадь примерно $100 \times 100 \text{ км}^2$; в — детальный снимок кратерированной равнины, полученный автоматической станцией «Марс-5» 23.II 1974 г. Площадь примерно $100 \times 100 \text{ км}^2$

деляются долиннообразные формы различного размера. На снимках различаются следы перемещения материала вниз по склонам и некоторые образования, вероятно эолового происхождения. Анализ поля высот района показывает, что в его пределах и на прилегающих территориях можно выделить тектонические впадины и поднятия, к различным элементам которых приурочены тектонические разрывные нарушения, дешифрируемые на снимках.

Кратеры. В исследуемом районе кратеры являются господствующими формами рельефа. Характер распределения их по поверхности — равномерно-случайный (см. рис. 4). Плотность распределения в кумулятивной форме представлена на рис. 5. Здесь видно, что на описываемой территории довольно много кратеров диаметром более 30 км. Плотность их лишь несколько ниже плотности кратеров соответствующего размера на лунных материках. Вероятно, большая часть крупных кратерных форм в районе исследований образовалась на раннем этапе эволюции планеты Марс, который можно сопоставлять с этапом интенсивного кратерообразования на Луне. Обращает на себя внимание перегиб графика $N_{>D}(D)$ на рис. 5, который приходится на интервал диаметров от 10 до 30 км. В области $D < 10-30 \text{ км}$ график функции имеет наклон, соответствующий показателю степени $\gamma \approx -1$. Для более крупных кратеров наклон графика больше ($\gamma \approx -2$). В целом характер зависимости $N_{>D}(D)$ напоминает аналогичную зависимость для лунных кратеров, хотя наклон графика функции здесь более пологий.

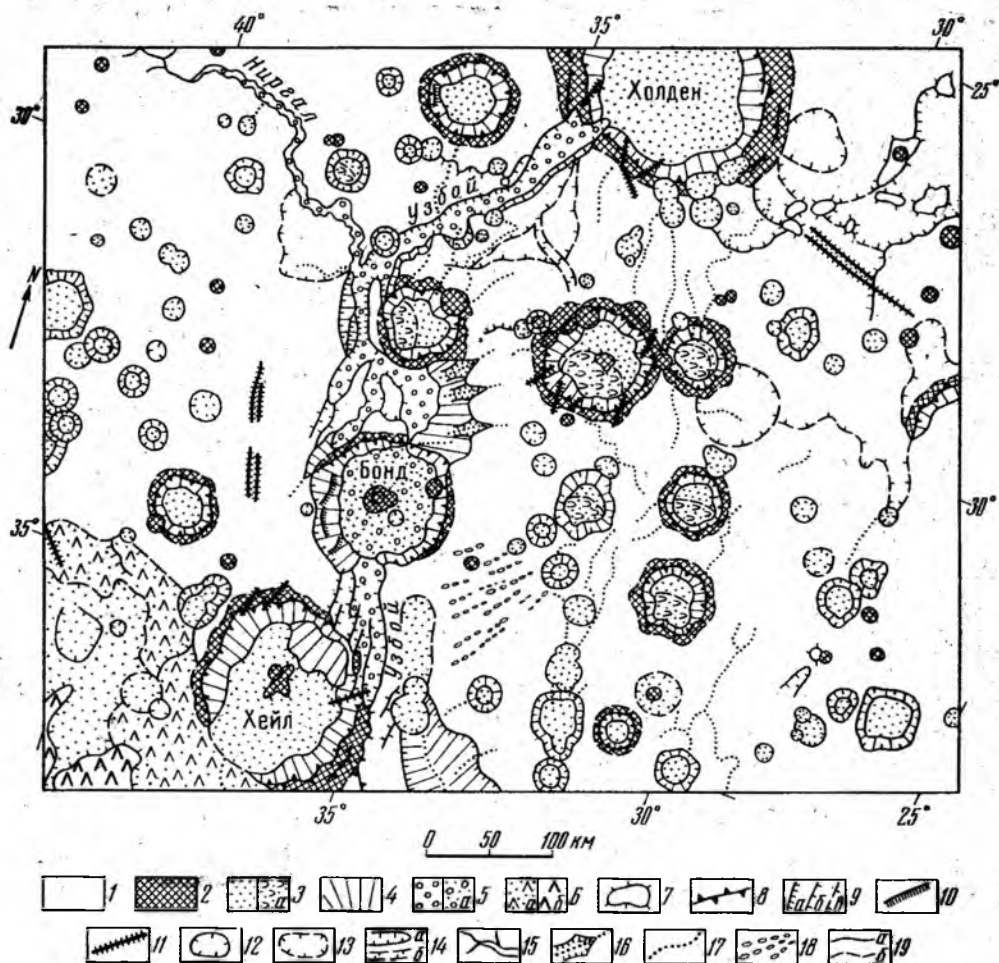


Рис. 3. Геолого-морфологическая карта района исследований.

I. Типы поверхностей: 1 — поверхность неустановленного генезиса, переработанная золовыми процессами (полого-волнистая равнина межкратерного пространства); 2 — аккумулятивные поверхности ударно-взрывного генезиса, переработанные золовыми процессами (полого-склонные возвышенности); 3 — поверхности, сформированные золовыми процессами, а — участки новейшей аккумуляции (субгоризонтальные поверхности и пологие склоны котловин выдувания и кратеров); 4 — поверхности различного генезиса, интенсивно переработанные склоновыми процессами (склоны различной крутизны на бортах кратеров и долин); 5 — поверхности, сформированные флювиальными процессами, а — интенсивно переработанные золовыми процессами (субгоризонтальные поверхности и пологие склоны днщ и бортов долин 1 и 2 типа), аккумулятивно-денудационная поверхность сложного генезиса; 6, а — мелкоопочный, бороздчатый рельеф, б — останцовый рельеф сильно расчлененных денудированных низкогорий (поверхность периферии вала структуры Аргир, расчлененная комплексом процессов — тектоника, линейная эрозия, дефляция); II. Формы и элементы рельефа: 7 — холмы; 8 — гребни; 9 — уступы, а — резко выраженные, б — средневыраженные, в — слабо выраженные; 10 — оползневые уступы; 11 — линейные элементы тектонической природы; 12 — кратеры; 13 — слабо выраженные депрессии неправильной формы; 14 — линейные депрессии, а — четков выраженные, б — слабо выраженные; 15 — долины, предположительно флювиального генезиса; 16 — овраги; 17 — борозды и мелкие долины неустановленного генезиса; 18 — котловины выдувания; 19 — геоморфологические границы

В морфологическом отношении кратеры исследованного района в основном аналогичны кратерам, ранее описанным в работах [2, 3]. В плане форма кратеров часто бывает полигональной. Количество прямолинейных сегментов бровки вала лежит в пределах от 4 до 11. Как видно из рис. 6, в ориентировке прямолинейных участков бровки кратеров намечается четыре предпочтительных направления, вероятно отражающих ориентировку тектонической трещиноватости в породах.

По характеру поперечного профиля кратеры разделяются на четыре типа — плоскодонные, чашеобразные, концентрические и кратеры с цен-

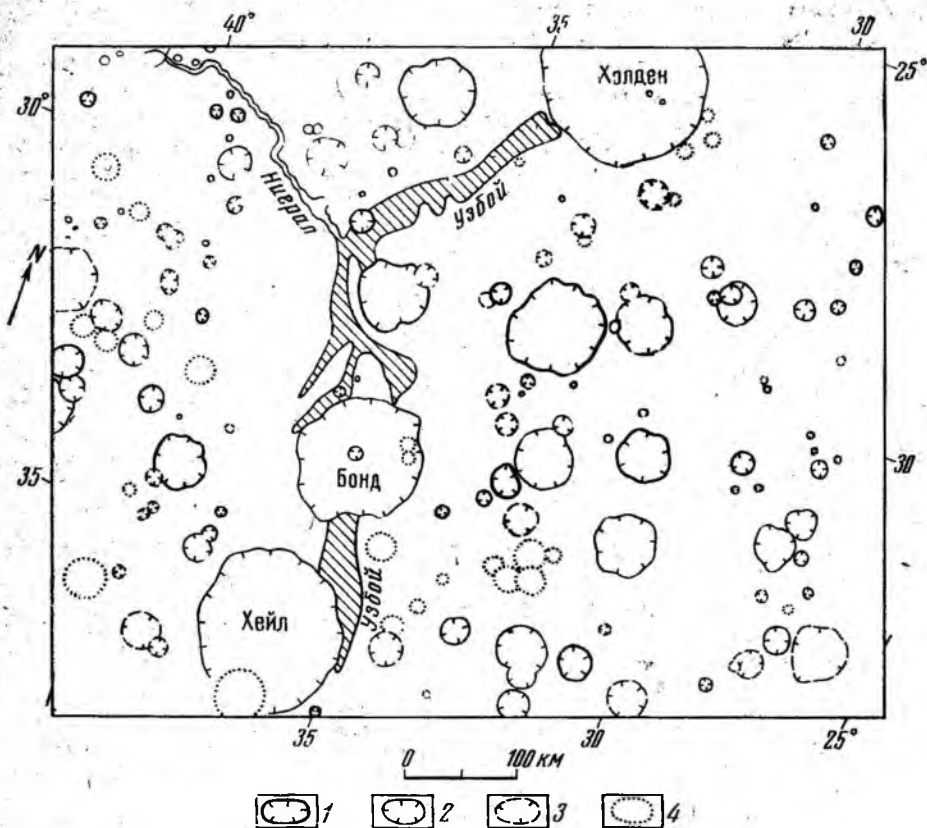


Рис. 4. Карта-схема распространности кратеров различных морфологических классов

тральной горкой. Наиболее многочисленны кратеры плоскодонные, наименее — концентрические, с «двойным валом» или концентрически вписанным бортовым уступом. Роль чашеобразных кратеров возрастает с уменьшением диаметров кратеров.

По степени выраженности в рельефе кратеры каждого морфологического типа были разделены на четыре класса (см. рис. 4). Класс 1 включает в себя кратеры с наиболее четкой бровкой и резко выраженным кольцевым валом. Они обладают максимальной относительной глубиной среди кратеров данного типа. Класс 2 представлен кратерами несколько сглаженных очертаний. Вал выражен хорошо. Относительная глубина меньше, чем в классе 1. К классу 3 отнесены кратеры сильно сглаженной формы, в которых, однако, основные элементы строения еще уверенно различимы. Кратеры класса 4 с трудом выделяются на фотоснимках как неглубокие круглые депрессии. Следы вала обнаруживаются с трудом. Относительная глубина наименьшая.

Морфологический анализ фотоснимков приводит к заключению, что последовательность форм от 1-го до 4-го классов представляет собой эволюционный ряд от молодых форм к наиболее древним. При этом скорость морфологической эволюции возрастает с уменьшением диаметра кратера, т. е. возможны случаи, когда малые кратеры зрелой морфологии (класс 3—4) накладываются на валы крупных кратеров (класса 1—2).

Результаты анализа распространности кратеров, относящихся к различным морфологическим классам (см. рис. 6), показывают, что среди кратеров диаметром менее 20÷30 км наблюдается определенное постоянство в соотношениях между формами разных классов. Частоты встречае-

мости кратеров класса 1—4 относятся друг к другу в среднем как 3 : 7 : 5 : 5. Среди кратеров более крупных размеров наблюдается уменьшение роли классов 3 и 4. На исследованной территории кратеры диаметром более 80 км представлены только формами классов 1 и 2.

Отмеченные выше особенности распределения кратеров по размерам (перегиб на графике $N_{>D}(D)$ в области 10÷30 км (рис. 5)) и выдержан-

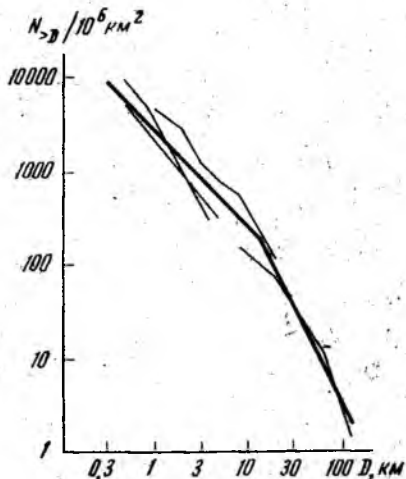


Рис. 5. Зависимость плотностного распределения кратеров от величины диаметра кратера

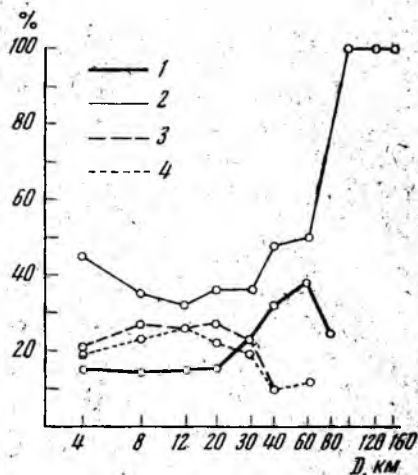


Рис. 6. Зависимость относительной распространенности кратеров различных морфологических классов от величины диаметра кратера

ность соотношений кратеров разных классов среди кратеров диаметром менее 20÷30 км (рис. 7) дают основание считать, что эта часть популяции кратеров достигла равновесного состояния, т. е. темп образования

кратеров на единице площади поверхности равен темпу разрушения кратеров. В этом случае доля кратеров того или иного класса отражает относительное время пребывания кратеров на стадии, соответствующей этому классу.

Долины. Для района исследования характерны линейные депрессии, морфологически близкие к долинам земных рек различного масштаба (см. рис. 2 и 3). Как уже отмечалось в работах [4, 5], морфология и характер пространственного размещения этих образований указывают на возможность водно-эрозионного генезиса по крайней

мере части этих форм. По размерам и морфологическим особенностям нами выделяется пять типов долин.

1-й тип представлен крупной долиной, условно названной Узбой, четко выраженная часть которой протягивается в меридиональном направлении от кратера Холден до вала структуры Аргир (см. рис. 2 и 3). Длина этой части долины составляет около 800 км. Очертания в плане несколько извилисты. Коэффициент извилистости 1,2.

В северной части описываемой территории долина Узбой имеет морфологию, наиболее близкую к земным речным долинам. Ширина ее здесь 25÷30 км. Поперечный профиль корытообразный. Западный борт ровный, в плане слабо изогнутый. Здесь с запада в долину Узбой открывается до-

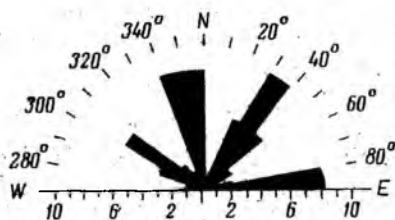


Рис. 7. Роза-диаграмма ориентировки прямолинейных участков вала в полигональных кратерах

лина с условным названием Ниргал, относимая нами ко второму типу. Восточный борт долины имеет извилистые очертания. На обоих бортах долины различаются рассекающие их малые оврагоподобные долинные формы, относимые к классу 4. Долина Узбой через понижение в юго-западной части вала кратера Холден «проникает» на его днище и далее к северу теряется. В юго-западной части кратера Холден наблюдаются следы врезания долины в породы днища кратера.

Южная часть долины Узбой имеет иное строение. Местами она расширяется до 80 км и теряет четкость очертаний. Местами через узкие (5–10 км) прорывы в валах кратеров Хейл и Бонд она выходит на их днища. Следов эрозионного воздействия долины на днищах этих кратеров на снимках не видно. К югу от кратера Хейл долина Узбой также теряется. Возможно ее южным продолжением является нечетко выраженная линейная депрессия в пределах вала Аргири к юго-востоку от кратера Хейл.

Важно проследить взаимоотношения долины Узбой с кратерами. Упомянутые выше крупные кратеры Холден (150 км), Бонд (100 км) и Хейл (150 км) производят впечатление форм, частично разработанных долиной Узбой (см. рис. 2). В то же время в 60 км к северу от кратера Бонд располагается кратер 1-го морфологического класса диаметром около 70 км, который явно наложен на долину Узбой. Около устьевой части долины Ниргал на днище долины Узбой наложен кратер диаметром около 25 км; морфологические особенности которого позволяют отнести его к формам 2–3-го класса.

2-й тип долин представлен долиной Ниргал (см. рис. 2 и 3), ранее широко известной по снимкам «Маринера-9». Это четко выраженная, протяженная (до 600 км), узкая (3–5 км, местами до 10–15 км), извилистая долина с симметричными крутыми бортами и плоским дном. Долина в плане имеет хорошо выраженный рисунок. Она образует систему коленообразных изгибов с длиной 100–200 км и амплитудой 20–30 км, которые в свою очередь осложнены меандрами с длиной волны 10–15 км при амплитуде 3–5 км. В долину Ниргал с обоих бортов открываются долины-притоки, относимые к 3-му типу. Особенно многочисленны они в ее верхней части, создавая характерный «речной» ветвистый рисунок всей системы.

К 3-му типу долин относятся дендритовидные «притоки» долин 1-го и 2-го типа (см. рис. 2 и 3). Длина этих «притоков» составляет десятки километров при ширине 0,5–1 км. Поперечный профиль корытообразный и V-образный. Долины 3-го типа часто оперяются «притоками» меньшего порядка, которые в свою очередь оперяются системой долин-оврагов (4-й тип). В целом картина напоминает типичную сеть земных речных долин и оврагов эрозионного происхождения. Нередко долины 3-го типа берут начало из кратеров диаметром 5–10 км.

4-й тип долин включает в себя оврагоподобные формы на бортах долин 1-, 2- и 3-го типа, а также на внутренних склонах кратеров (см. рис. 2, 3). Характерным примером их являются овраги на восточном борту долины Узбой к северу от кратера Бонд. Максимальная длина оврагов доходит до 20–30 км при ширине 3–5 км. Они имеют желобовидный и V-образный поперечный профиль. Склоны пологие.

5-й тип долин представлен узкими (0,5–1 км), относительно длинными (более 100 км) неясно выраженными бороздами, характерными для межкратерного пространства к югу от кратера Холден (см. рис. 2 и 3). При пересечении кратерных валов эти борозды расширяются. Там, где долины 5-го типа открываются в долины 1-го и 2-го типа, наблюдаются желобообразные понижения в рельефе.

Явления на склонах. Следы перемещения материала поверхности вниз по склонам наблюдаются, главным образом, на бортах кратеров и местами на бортах долины Узбой. В кратерах можно установить последовательность проявлений процессов разного типа.

На ранней стадии эволюции кратерных форм, когда они еще достаточно крутосклонны, на внутренних бортах кратеров наблюдаются концентрические дугообразные ступени-террасы, а также смещенные вниз блоки пород неправильной формы. Часто на снимках можно выделить характерные признаки оползневой эрозии — наличие цирка, стенки отрыва и оползневой тела. На внутренних склонах кратера Хейл (см. рис. 2, а) наблюдается беспорядочно бугристый рельеф, характерный для некоторых проявлений процесса оползания на Земле. На имеющихся изображениях видно, что формы рельефа склонов, связанные с оползневой эрозией, разрабатываются в дальнейшем системой радиальных борозд и желобов (долины-овраги 4-го типа) (см. рис. 2, б). Вероятно, линейная эрозия склонов является отражением следующей стадии их эволюции. На склонах, которые никогда не обладали значительной крутизной (например, восточный борт долины Узбой к северу от кратера Бонд), линейная эрозия может быть характерна для начальных стадий эволюции склонов.

Следует отметить, что в кратерах 2-го и 3-го типа крутизна внутренних склонов в нижней части обычно несколько больше по сравнению с верхней (см. рис. 2, б). Формирование такого «уступа» требует удаления материала от подножья склона. Вероятным механизмом выноса материала может быть дефляция.

Эоловые образования. На исследованных изображениях наблюдается ряд образований, которым можно приписать эоловую природу. В межкратерном пространстве и на днищах кратеров видны темные пятна изометрической формы поперечником в десятки километров (см. рис. 2 и 3). На крупномасштабных снимках «Маринера-9» аналогичные образования разрезались в поля эоловых гряд и барханов [4, 6].

В центральной части изученной территории наблюдаются скопления удлиненных котловин неправильных очертаний размером менее 2—3 км. В ориентировке их замечена некоторая закономерность. Длинные оси этих форм образуют радиальную систему, сходящуюся в некотором центре, располагающемся в южной части территории. Никаких свежих образований, с которыми можно было бы связать появление котловин в этом месте, не обнаружено. Возможно, это котловины выдувания по тектонически ослабленным зонам, аналогичные эоловым эрозионным формам, описанным в работе [7].

В юго-западной части территории в зоне северного обрамления структуры Аргир наблюдается расчлененный холмистый рельеф (см. рис. 2, 3). Особенности морфологии поверхности в этой зоне дают основание предполагать, что рельеф ее сформировался преимущественно за счет эолового препаиривания тектонических нарушений пород вала кольцевой структуры Аргир.

Тектонические образования. Анализ поля высот по картам масштаба 1:5 000 000 [1] показывает, что в районе исследований и на сопредельных территориях можно выделить ряд крупных, не связанных с кратерами, впадин и поднятий с амплитудой высот 1—3 км (см. рис. 1). На основании опыта земной геологии можно считать эти образования тектоническими структурами. Основую часть района исследований занимает несколько вытянутая в меридиональном направлении депрессия с высотными отметками ниже нулевого уровня. На юге она ограничена возвышенностью вала структуры Аргир. На севере в окрестностях кратера Холден наблюдается поднятие с высотными отметками более 1 км, вытянутое в широтном направлении. Это поднятие отделяет упомянутую депрессию от другой депрессии, расположенной в пределах Эритрейского моря.

В северо-западной части района исследований наблюдается борт тектонического поднятия, расположенного далее к западу. Максимальные высоты поверхности в пределах этой структуры в районе исследований превышают 3 км. Простирается борта поднятия субмеридиональное. По характеру расположения изогипс это поднятие представляется более

молодым, чем поднятие в районе кратера Холден. На склоне описываемого поднятия располагаются верховья долины Ниргал.

На снимках исследуемой территории виден ряд борозд, уступов и линеamentов неясной морфологии (см. рис. 2, 3), которые, вероятно, являются выражением тектонических разрывов, осложняющих описанные крупные структуры. Местами наблюдаются линеamentы, пространственно связанные с крупными кратерами.

Обсуждение результатов. Рассматривая совокупность выделенных форм, можно достаточно убедительно говорить о наличии ударно-взрывных, склоновых, эоловых и тектонических процессов на поверхности Марса. Наиболее интересным и спорным является вопрос о генезисе долин различных типов и времени их образования. В процессе настоящего исследования не получено однозначного решения вопроса о происхождении марсианских долин. Общее сходство очертаний с долинами Земли, существование иерархии притоков, закономерные изменения в морфологии долин при переходе от 1-го класса к 4-му, разработка валов и характерные «прорывы» в древние кратеры свидетельствуют в пользу водно-эрозионного происхождения долин 1—4-го типов. В отношении долин 5-го типа, в силу неясного морфологического их выражения, определенных выводов сделать нельзя. Вывод о водно-эрозионном генезисе долин влечет за собою далеко идущие последствия. Признавая водно-эрозионное происхождение ряда долин, приходится допустить значительные запасы погребенной и замороженной воды или резкую потерю ее Марсом в ходе геологической истории, а также существенные отличия в климате и составе атмосферы, допускающие существование жидкой воды хотя бы во временных, но достаточно мощных потоках. Поэтому пока нельзя исключить возможность образования марсианских долин за счет какого-либо иного механизма, например путем эоловой разработки в зонах деградации мерзлых пород вдоль тектонических разломов. Тем не менее представляется допустимым в качестве рабочей гипотезы принять, что долины 1—4-го типов имеют водно-эрозионное происхождение и с этих позиций проводить дальнейший анализ.

Неясным остается вопрос о местонахождении вынесенного из долин материала. Вероятно, часть его аккумулярована на днищах долин, но основная доля отложена где-то в других местах. Возможно, бассейнами накопления вынесенного материала являются кратеры Холден, Бонд, Хейл, Аргир. Анализ пространственного размещения и морфологии долин и взаимоотношений их с другими формами рельефа позволяет получить сведения о времени их существования. Интересно отметить, что в 200 км к северо-востоку от кратера Холден на снимках прослеживается на протяжении 200—300 км обрывок крупной долины с характерными фурациями. Американские исследователи присвоили ему условное название Ландон (см. рис. 1). Еще далее к северу с приближением к местности хаотического типа на фотоснимках видны реликты других крупных долинообразных форм. Создается впечатление, что долина Узбой представляет собой реликт части крупной магистральной долины, которая была разорвана на отдельные фрагменты поперечными тектоническими структурами и перестала существовать как единое целое еще в конце этапа интенсивного кратерообразования.

Направление долин 2, 3, 4-го типа согласуется с современным рельефом. Верховья долины Ниргал расположены на склоне ярко выраженного тектонического поднятия. Слабо расчлененный характер местности здесь вступает в противоречие с наличием большого генерального уклона (~1/50). Это противоречие может быть снято предположением о том, что поднятие происходило тогда, когда формирование долины Ниргал уже почти прекратилось.

Таким образом, для исследованной территории намечается следующая этапность геологического развития. Этап интенсивного кратерообразова-

ния, возраст которого по аналогии с формациями Луны можно оценить в 3,5—4,5 млрд. лет, здесь представлен формированием кольцевой структуры Аргир и образованием большинства наблюдаемых на снимках кратеров крупнее 20—40 км. В течение части этого этапа происходила разработка магистральной долины, фрагменты которой сохранились в виде долин Узбой и Ландон. Второй этап представлен формированием наблюдаемых сейчас кратеров диаметром менее 20—30 км. В это время происходило затухание процессов линейной эрозии и увеличение роли эоловых процессов. Тектоническое воздымание местности на северо-западе территории по времени совпадает с резким ослаблением эрозии в долине Ниргал. На последнем этапе в пределах исследуемой территории происходит преимущественно эоловая переработка поверхности, кратерообразование и гравитационное перемещение вещества на склонах. Судя по четкости выраженности некоторых долин-оврагов 4-го типа, образование их также может быть отнесено к этому этапу.

Можно полагать, что история геологического развития изученного района должна рассматриваться как характерный пример общего развития поверхности Марса. Геолого-морфологическое изучение фотоснимков поверхности планетных тел дает ключ к пониманию истории их развития и выявлению действующих процессов, как это показывают исследования Луны и Марса.

Авторы выражают глубокую признательность Г. А. Бурбе за участие в составлении и оформлении карт, а также Л. И. Комиссаровой за помощь в работе.

Дата поступления
9 июля 1974 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Atlas of Mars. Semicontrolled photomosaic MC-19 and MC-26. Department of the Interior United States Geological Survey, 1973.
2. R. Leighton, B. Murray, R. Sharp, J. Allen, R. Sloan. Science, 149, 627, 1965.
3. R. B. Leighton, N. H. Horowitz et al., Science, 166, 49, 1969.
4. H. Masursky. J. Geophys. Res., 78, No 20, 4009, 1973.
5. D. T. Milton. J. Geophys. Res., 78, No 20, 4034, 1973.
6. T. A. Cutts, R. S. U. Smith. J. Geophys. Res., 78, No 20, 4139, 1973.
7. G. F. McCauley. J. Geophys. Res., 78, No 20, 4123, 1973.