



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 13 • № 1 • 2017 С. 11 – 21

Оглядова стаття

УДК 523.4

Особенности строения поверхности Цереры

А.П. Видьмаченко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, 03143, г. Киев, ул. Академика Заболотного, 27

Некоторые из кратеров Цереры имеют явно вулканическое происхождение, а ряд из них, возможно, являются действующими. Объект должен был иметь намного больше ударных кратеров, чем есть сейчас. А это значит, что поверхность Цереры и сейчас подвержена сильной геологической активности. На Церере обнаружено только 16 кратеров больше 100 км в диаметре, а крупнейший кратер, бассейн Керуан, достигает всего 280 км. Полагают, что лед под поверхностью Цереры медленно ослабляет кору, заставляя ее со временем разглаживаться. Довольно темная поверхность Цереры усеяна более 130 яркими пятнами. Большая их часть это, скорее всего, ударные метеоритные кратеры. Оказалось, что самое яркое пятно на Церере состоит из двух крупных и многих мелких частей, находящихся в кратере Оккатор, диаметром 92 км и 4 км глубиной. Анализ белых пятен показывает, что они содержат в себе соли, сформировавшиеся в присутствии воды. Это говорит о наличии гидротермальных источников энергии и огромных залежей соды в недрах этой карликовой планеты. Помимо соли, в образовании этих пятен принимал участие и лед. Второй по яркости кратер Цереры диаметром 6 км называется Оксо. Он находится как бы в глубине отверстия, образованного при провале пород в очень большом количестве. Причем на дне кратера обнаружили минералы с необычным геохимическим составом. Самая большая гора Цереры Ахуна была геологически активной, по крайней мере, в течение последнего миллиарда лет, а возможно, активна и сейчас. Образовалась эта гора в результате криоизвержений. Существование на планете криовулканов подтверждает предположение о вероятном наличии в ее недрах озер из соленой воды и позволяет объяснить, каким образом эта вода достигает поверхности. Подобной геологической активностью можно объяснить отсутствие на Церере больших кратеров. Таким образом, наблюдения зонда «Рассвет» показывают, что Церера — относительно активный объект. Наличие карбонатов на поверхности Цереры говорит о том, что в ее недрах существовали или существуют и сейчас гидротермальные процессы, которые выбросили эти вещества на ее поверхность.

Ключевые слова: Церера; характеристики поверхности; морфологическая структура.

1. ВВЕДЕНИЕ

Составляя каталог положения звезд, 1 января 1801 г. Дж. Пиаци заметил, что одна из них изменила положение относительно предыдущей ночи. Когда же по предвычисленным И. Боде и К. Гауссом координатам 1 января уже 1802 г. Дж. Пиаци снова обнаружил объект в предусмотренном месте, то назвал его Церера, в честь богини-охранительницы острова Сицилия. После открытия других рядом расположенных подобных тел Церера под номером 1 возглавила список малых планет. Поскольку эти тела даже при телескопических наблюдениях не показывали наличие видимых дисков, то их называли «астероид» — звездообразный объект [18, 27, 39]. Орбиты большинства из них находятся в поясе между орбитами Марса и Юпитера, поэтому он получил название «Главный пояс астероидов». 21 августа 2006 г. XXVI Ассамблея МАС удовлетворила рекомендацию своей комиссии по номенклатуре и приняла решение о том, чтобы Церера, Плутон и еще один объект пояса Койпера — Макемаке — были отнесены к карликовым планетам [28, 35, 36].

2. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Ультрафиолетовые (УФ) снимки с Космического телескопа им. Хаббла обнаружили на поверхности Цереры темное пятно, которому было присвоено имя первооткрывателя Цереры — Пиаци [20], а также яркое белое пятно (рис. 1). По наблюдениям после 2005 г. с телескопом Кека в инфракрасной (ИК) области спектра с использованием адаптивной оптики построили первые карты поверхности Цереры, которые покрывали около 80% поверхности [2–4]. Вариации отражательной способности относительно среднего значения (около 9%) составляют $\pm 6\%$, хотя там обнаружены как довольно темные, так и яркие пятна, а также ряд идущих от полюса до полюса темных полос. По спектральным телескопическим наблюдениям были определены основные черты глобального состава поверхности Цереры [36]. Так, было получено, что состав поверхности не является первичным и не состоит из углеродных хондритов типа метеоритного вещества.

Но были обнаружены силикаты, карбонаты, другие соли, с рядом агентов вызывающих потемнение поверхности. Наземные наблюдения также показали наличие минералов, имеющих гидроксил OH, образованную с участием воды глину, аммиачную глину и т.п. То есть эти минералы являются своеобразными маркерами изменения первичных минералов под воздействием воды. И именно водяной лед,

Видьмаченко Анатолий Петрович; ✉ vida@mao.kiev.ua

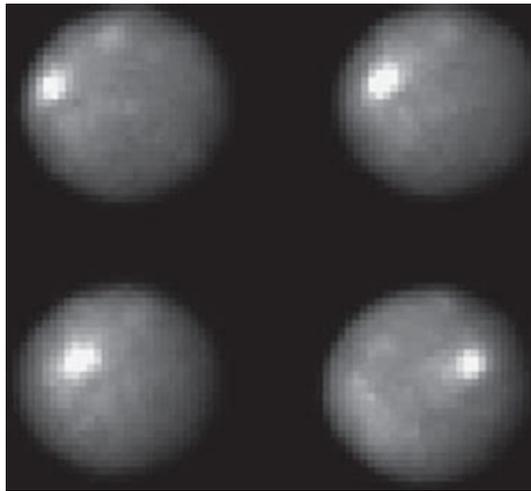


Рис. 1. Изменение положения яркого пятна на поверхности Цереры в результате поворота вокруг оси на 93° [25]

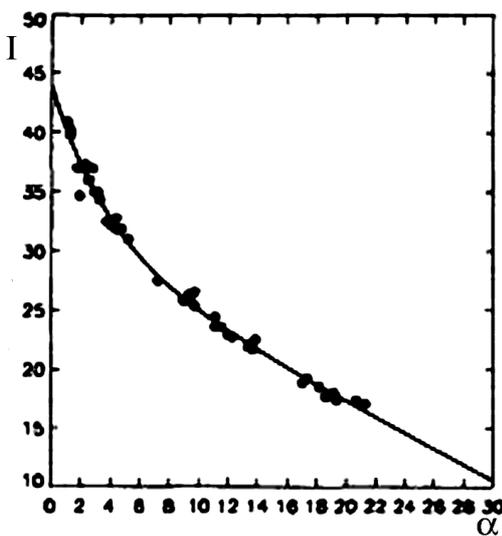


Рис. 2. Фазовая зависимость блеска Цереры [19]

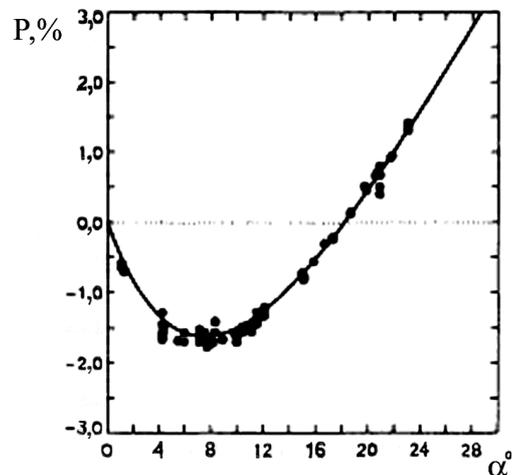


Рис. 3. Фазовая зависимость степени поляризации Цереры [19]

смешиваясь с силикатами, изменял их. Даже с учетом создаваемых Юпитером помех Церере удалось вырасти почти до 1000 км в диаметре и собрать массу, которая составляет около четверти общей массы обломков, входящих в состав Главного астероидного пояса [27].

Фотометрические, поляризационные и спектральные наземные наблюдения показали следующее.

1. На фазовых зависимостях обнаружен эффект оппозиции блеска (рис. 2) и довольно глубокая ветвь отрицательной поляризации (рис. 3).

2. Долготная зависимость блеска в визуальных лучах имеет очень малую амплитуду ($< 0,03^m$); на ней помимо основных минимума и максимума, соответственно на долготах 230° и 100° , есть и вторичные: на 30° и 0° [6]. Вторичный максимум совпадает с ярким пятном на поверхности (рис. 1). При $\lambda = 3,7$ и $3,9$ мкм амплитуда вариаций больше, особенно на долготах $205 - 215^\circ$, где она достигает 27% [22].

3. Церера имеет очень малое геометрическое альbedo [17] со специфической спектральной зависимостью. Наименьшее его значение $\sim 0,03$ приходится на $\lambda \sim 300$ нм. Оно круто увеличивается в дальнем УФ и достигает значения 0,08 при $\lambda = 400$ нм. В диапазоне $400 > \lambda > 800$ нм альbedo изменяется в пределах 0,08–0,09; в далекой ИК области обнаружены молекулярные полосы поглощения. В целом, спектр Цереры напоминает углистые хондриты и астероиды С-типа с поглощением в $\lambda \approx 3$ мкм [21]; оно обусловлено гидратами или гидроксидными минералами и характерны некоторым астероидам С-типа; но, например, отсутствуют в метеоритах, спектры которых можно найти, например, в спектральной библиотеке ASTER (<http://speclib.jpl.nasa.gov>).

4. В видимых λ имеет место достаточно большое значение отрицательной поляризации P , которое слабо зависит от λ . Наблюдения при $\lambda = 10$ мкм обнаружили, что $P = 0,22 \pm 0,03\%$, значение плоскости поляризации $\psi = 165 \pm 5^\circ$ и $0,60 \pm 0,12\%$, $\psi = 137 \pm 7^\circ$, соответственно, при $\alpha = 3,7^\circ$ и 13° [1].

5. Наблюдение в тепловой области спектра указали на уменьшение яркостной температуры с увеличением λ ; по данным в миллиметровом и сантиметровом участках спектра сделан вывод, что диэлектрические свойства верхнего слоя толщиной ≈ 3 см соответствуют сухой глине [41, 42].

3. ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «РАССВЕТ».

«Dawn» (в переводе «Рассвет») — это автоматическая межпланетная станция, запущенная НАСА 27.09.2007 для исследования астероида Веста и карликовой планеты Цереры. В течение года этот космический аппарат (КА) провел промежуточные исследования Весты с орбиты вокруг нее. В сентябре 2012 г. он продолжил полет к Церере. К карликовой планете аппарат приблизился 6.03.2015 и перешел на круговую орбиту [11, 12].

Внутренняя дифференциация вещества. Термодинамическое моделирование показало, что Церера, вероятно, испытала процесс дифференциации вследствие плавления исходного материала после аккреции. Считают, что ниже преимущественно скалистого поверхностного слоя почва, скорее всего, состоит из смеси льда (до 35% по объему), различных солей, клатратов, силикатов и т.п. Относительно низкая объемная плотность ($\sim 2,16$ г/см³) указывает на то, что значительная часть всей массы объекта представляет собой водяной лед (20–40%). Большая часть этой воды может быть локализована во внешней оболочке. Полученные КА «Рассвет» гравитационные и топографические данные позволяют оценить, что этот внешний слой ледяной мантии имеет толщину 45–90 км и может содержать до 200 млн. км³ воды. Это даже больше, чем количество пресной воды на Земле [5]. Не исключается и возможность локальных вариаций толщины внешнего слоя. А глубже может снова залегать каменистый слой с высокой плотностью. Считают, что внутри Цереры под ледяной мантией находится скальное ядро. То есть тело подверглось дифференциации с образованием ледяной коры, более глубоким залеганием каменистой составляющей и возможным наличием в прошлом подповерхностного океана [24, 29, 40]. Таким образом, имеем богатую летучими составляющими оболочку (кору), перекрывающую более плотную сердцевину из гидратированных силикатов [13].

Молодые формы рельефа. Бортовой спектрометр позволил выявить основные минералы, присутствующие на поверхности Цереры: большое количество темного компонента, значительное количество аммиачных филосиликатов [11], карбонатов [12] и др.; на небольших участках поверхности была обнаружена вода. Поверхность показывает однородность состава, хотя и существуют вариации (например, наличие более голубого материала), связанные с несколькими молодыми кратерами (рис. 4) и обширными областями со светлым относительно обогащенным аммиаком [11] материалом, окружающими, например, кратеры Данту (Dantu) и Керван (Kerwan, 287 км). Большая яркость и сглаженные кратеры в области вокруг больших ударных кратеров Урвара (Urvara, 170 км) и Ялоде (Yalode, 267 км) также появляется спектрально-различными, с относительно богатым аммиаком составом. Эти области контрастируют с возвышенностью равнины Ханами (Hanami planum), которая отображает более грубый рельеф и локализацию обедненной аммиаком области, связанной с самым ярким материалом на поверхности.

Интересен пример грунта, расположенного в кратерах Оксо (Oxo, 10 км) и Мессор (Messor). При спектрометрии поверхности с близкого расстояния данные с высоким пространственным разрешением улучшили возможность обнаружить воду, ясно выделяя диагностические признаки поглощения водяным льдом. Моделирование спектров в этих кратерах показало, что в пределах поля зрения количество водяного льда доходит до 15–20%, с размером зерна 100–200 мкм. Водяной лед, как правило, находится в тени в кратерах вблизи их обода.

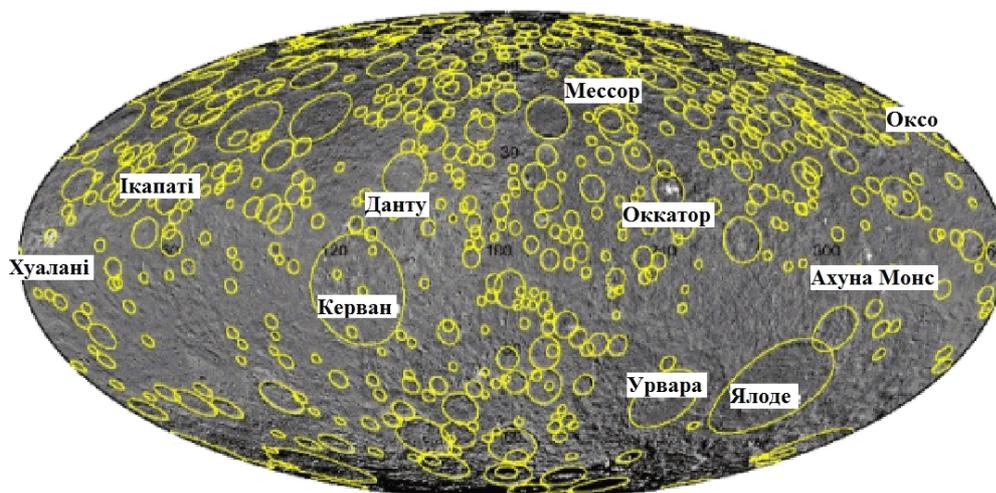


Рис. 4. Глобальное распределение кратеров диаметром более 20 км

В общем, поверхность показывает однородность химического состава, хотя и существуют вариации, связанные с несколькими молодыми кратерами, и с большими светлыми областями, что, например, окружают кратеры Данту и Керван. Судя по наличию в настоящее время несколько молодых форм рельефа, в том числе с признаками недавнего воздействия водяного льда, мы имеем дело с геологической активностью подповерхностных процессов планеты. Это указывает на недавние подъемы на поверхность менее плотного внутреннего материала, в том числе солей и льда. То есть на поверхности найдено потоки вещества, экструзии, купола; некоторые из них являются геологически совсем недавними [14, 15, 38]. На это же указывает и то, что отложения карбонатов и других солей в первую очередь связаны с молодыми кратерами. Наблюдаются также и некоторые местные обнажения отложений с участием H_2O , особенно в более высоких широтах в условиях низкой освещенности. Все эти особенности должны быть очень молодыми, поскольку водяной лед является неустойчивым при температурах, характерных для условий на поверхности Цереры. Присутствие аммиачных минералов и отложений солей может быть основной причиной пониженной температуры при образовании подземных вод, вызванных таянием льда, и, возможно, это могло вызвать ускорение процессов минерализации и замедление процессов внутренней дифференциации. Поэтому такие материалы, как глины и соли, должны были образованы внутри Цереры, а сегодня они существуют на поверхности планеты или же вблизи поверхности.

Следует отметить, что альбедные и цветовые характеристики поверхности Цереры, полученные из наземных наблюдений и с КА, в целом согласованы между собой.

Криогенные структуры на поверхности. Некоторые характеристики рельефа Цереры указывают на то, что данное космическое тело, вероятно, является активным и сегодня. Так, крупномасштабные изображения поверхности Цереры позволили выявить изолированную возвышенность, которую назвали Ахуна Монс (Ahuna Mons). Ее размер, форма и морфология очень уникальные и существенно отличаются от других топографических высот, разбросанных по всей поверхности. Исходя из ее морфологии и наличия раздробленной вершины, это позволяет интерпретировать гору Ахуна Монс как криовулканический купол [16, 23]. Гора имеет эллиптическую основу размером $21 \times 13 \text{ км}^2$; она возвышается над окружающей местностью на $\approx 4,5 \text{ км}$ (рис. 5).

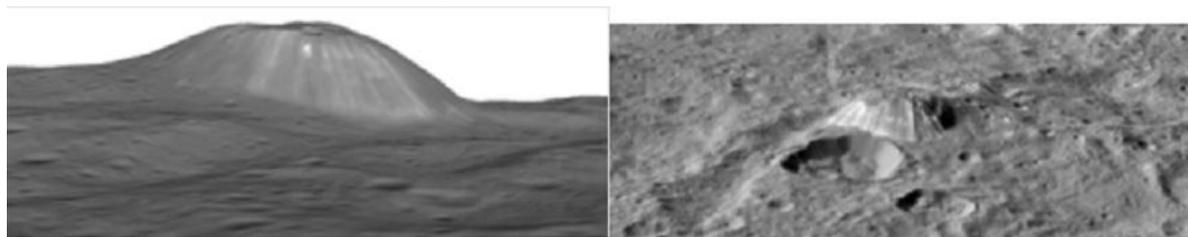


Рис. 5. Вид на западную сторону горы Ахуна Монс (слева) и на окружающую местность (справа)

Выделяются две морфологические особенности этой горы: осыпи по бокам и слегка прогнутая вершина; в верхней ее части находятся гребни и впадины, склоны очень крутые и их наклон составляет $30-40^\circ$; они содержат достаточно яркие и темные аномалии (на $\sim 15\%$ ярче и на $\sim 5\%$ темнее относительно среднего глобального альбедо). Их интерпретируют как гравитационные осыпания по склонам камней с различным химическим составом. Переход между вершиной и склонами достаточно резкий, но накопление материала у основания очень незначительное. На северо-восточном склоне горы находится темный блок, который, возможно, представляет собой недавний поток извержения. В совокупности все морфологические детали говорят о признаках молодого возраста этой вершины. Таким образом, можно считать, что гора Ахуна Монс была сформирована вулканическим процессом, включающим подъем криомагмы и ее выход на поверхность с последующим образованием купола. Спектроскопический анализ региона горы Ахуна Монс и окружающей местности на основе спектральных данных с КА, указал на то, что этот участок геологически отличается от соседних регионов целым рядом диагностических спектральных показателей. Так, общий состав материала поверхности горы Ахуна Монс имеет большое количество водосодержащих минералов и существенно большее разнообразие карбонатов на основе натрия. Последнее также хорошо согласуется с составом ярких пятен, например, в кратере Оккатор (Occator, 92 км) [12]. Местность у горы Ахун Монс характеризуется сглаженной, существенно менее кратерированной поверхностью, чем на более отдаленных участках поверхности. Гора связана с обширным топографическим поднятием поверхности шириной около 30 км (рис. 5, справа).

Таким образом, анализ размеров и количества кратеров на склонах ограничивают возраст горы Ахуна Монс значениями 70–210 млн лет [16, 23]. Такой большой диапазон возраста связан с использованием двух независимых методик хронологии. Поэтому гору Ахуна Монс следует считать сложившуюся в недавнем геологическом прошлом. Полученные изображения указывают на формирование горы методом экструзии материала через узкое отверстие. То есть именно подземная жидкая вода и ее замерзающая фракция должны влиять на способность коры Цереры поддерживать видимую топографию поверхности.

Вязкая релаксация может работать преимущественно в приэкваториальных широтах, где температура несколько выше, чем в полярных областях. Так, среднегодовая температура для плоского рельефа на широте, где находится гора Ахуна Монс, составляет ~ 155 К.

Однако никаких других криовулканов подобного Ахуна Монс размера на Церере пока не обнаружено. Если предположить, что криовулканизм имел место на Церере не только в последнее время, то следует признать, что на карликовой планете должен существовать определенный процесс, который разрушает, или скрывает старые криовулканы. Некоторыми исследователями предложено, что многие топографические возвышенности на Церере также могут представлять собой вязко расслабленные криовулканические структуры. Исходя из анализа состава поверхности Цереры следует предположить, что если бы криовулканические структуры на Церере имели примерно вдвое меньше льда, то вязкая релаксация смогла бы в значительной степени изменить топографию за время всего лишь $10^7 - 10^8$ лет. Именно такой механизм объяснил бы результаты наблюдений КА «Рассвет» о геологически молодом криовулканизме на Церере. Исходя из такого предположения можно сделать вывод, что, скорее всего, криовулканизм был активным на Церере в течение всей ее истории. Поэтому следует осуществить идентификацию других старых вязко расслабленных криовулканических куполов. И это позволило бы ввести количественное ограничение на криовулканическую историю Цереры.

Яркие пятна на поверхности. Миссия КА «Рассвет» обнаружила участки с относительно высоким альбедо (яркие пятна — ЯП) на поверхности Цереры. То есть, как правило, темная поверхность карликовой планеты перемежается с районами с гораздо более высоким альбедо. Эти наиболее яркие области были предварительно интерпретированы как содержащие большое количество гидратированного сульфата магния. Они не имеют преимущественной ориентации или расположения, но многие из них расположены на достаточно молодых ландшафтах. Результаты различных оценок предусматривают более высокую эффективность растекания (или размягчения) вещества на поверхности Цереры, чем для аналогичных особенностей на других телах близкого размера. Это говорит о низкой вязкости этого материала. Самыми заметными представителями такого материала есть два очень яркие пятна на дне кратера Оккатор. На сегодня они являются самыми яркими деталями на всей поверхности. Более 80% ЯП связаны с результатами возможных ударных столкновений; другие случаи относятся к горе Ахуна Монс. Значение альбедо ЯП, например, на длине волны 1,2 мкм примерно на 40% больше, чем среднее альбедо поверхности Цереры. Это говорит о том, что именно карбонаты, давая полосы поглощения на длинах волн 3,4 и 4,0 мкм, являются основным светлым агентом в этих регионах. Другой спектральной особенностью таких пятен является уменьшение глубины полосы, связанной с аммиаком в длине волны 3,05 мкм. Таким образом, возможной интерпретацией такого светлого вещества на видимой поверхности является обезвоживание этих областей в результате удара о поверхность. То есть эти яркие области, которые назвали факелы, есть ни что иное, как солевые отложения. Факелы можно определить как области с альбедо почти на 30% выше, чем в окружающей местности. Анализ полученных спектральных данных показал, что ЯП содержат такое неорганическое вещество, как сульфат магния. Это указывает на то, что ЯП должны образовываться эндогенно. Факелы разделяют на четыре типа геологических структур (рис. 6): а) центральная впадина и разломы в достаточно больших кратерах; б) сдвиги на стенах кратеров; в) выбросы из кратера типа «сплошное одеяло»; г) особенность на поверхности типа горы Ахуна Монс.

В целом на Церере обнаружено около 300 факелов, и более 200 из них расположены на приподнятых венцах кратеров или на стенах с оползнями. Спектры ярких областей, например, в кратере Оккатор (рис. 6,а), согласуются с большим количеством карбоната натрия. Они смешиваются с темными компонентами и небольшими количествами слоистых силикатов, а также с карбонатами аммония или хлорида аммония. Такие соединения эндогенные, и они являются твердым остатком, образованным после кристаллизации рассолов и других веществ, которые вышли на поверхность из-под поверхности. Стены кратера Оккатор имеют террасные особенности, образовавшиеся в процессе формирования ударного кратера. Эти концентрические разломы забираются все выше по стенам террасы. Морфология кратера предусматривает, что Оккатор — это молодой кратер. Возраст формирования материала на стенах составляет $\sim 6,9$ млн. лет, а сам кратер образовался $\sim 34 \pm 2$ млн. лет назад. Эту разницу в возрасте можно объяснить обвалом стен и последующими изменениями. Яркий материал центрального углубления еще моложе — $\sim 4,0 \pm 1$ млн. лет.

В качестве альтернативы составу ЯП можно предположить, что внутренняя температура на определенной глубине на Церере может быть выше эвтектической температуры подземных рассолов; и такие особенности могут существовать в жидком состоянии и сегодня. Альбедо ярких пятен, их синеватый цвет и физическая гладкость поверхности с пятнами являются указателями молодости этой поверхности. Именно это согласуется с исходно жидким состоянием вещества как следствием воздействия таяния подповерхностного водяного льда и его возможного извержения на поверхность. Так что это также предполагает наличие подповерхностных отложений водяного льда. Большое альбедо характери-

зует, например, и кратер Данту (рис. 7), расположенный в старом ударном бассейне с преимущественно разглаженным рельефом. Это соответствует среднему состоянию поверхности Цереры.

Таким образом, большинство ярких пятен на поверхности планеты состоят из филлосиликатов, определенных соединений на основе метана, карбонатов на основе Na, Mg и Ca; комплекс факелов в кратере Оккатор добавляет еще и минералы на основе гидроксильной группы OH. Отметим, что на поверхности Цереры почти равномерно находятся аммонизованные филлосиликаты. Хотя есть и особые регионы, такие как, например, в кратере Хуалани (рис. 8), в котором выброс смог «раскопать» очень контрастный материал, как светлый, так и довольно темный. Этот кратер расположен на экваториальной равнине с тем же именем и является одним из самых заметных ярких блоков, отмеченных КА еще в момент своего первого подхода к Церере в начале 2015 г. Этот кратер показывает значительную спектральную изменчивость. Так, спектральные характеристики в длинах волн 2,7 и 3,05 мкм показывают наличие, соответственно, водосодержащих минералов и аммиачные слоистые силикаты; они также показывают уменьшение глубины полосы в светлом пятне в кратере. Спектральные полосы в длинах волн 3,4 и ~4 мкм, свидетельствуют о наличии там карбонатов, и они показывают их умеренную изменчивость. Область Хуалани показывает самый высокий тепловой контраст на поверхности Цереры. Это может быть связано с альбедо и текстурой материала компактно выброшенного в конкретных углублениях. В кратерах Оккатор и Оксо в рассеянных лучах наблюдалось развитие тумана. Это указывает на возможное региональное обогащение приповерхностных подземных льдов и их выход на поверхность.

У подножия южной части кратера Оксо на части яркого материала была спектроскопически проведена положительная идентификация H₂O. Кроме того, в кратере Оксо практически отсутствуют вторичные кратеры и разломы. Это согласуется с его геологически молодым возрастом. Самый яркий и достаточно большой факел находится в кратере Оккатор (рис. 6,а). Факелы в основном находятся в глубоком его месте на глубине более 3 км; большинство из них содержат своеобразные разломы на поверхности.

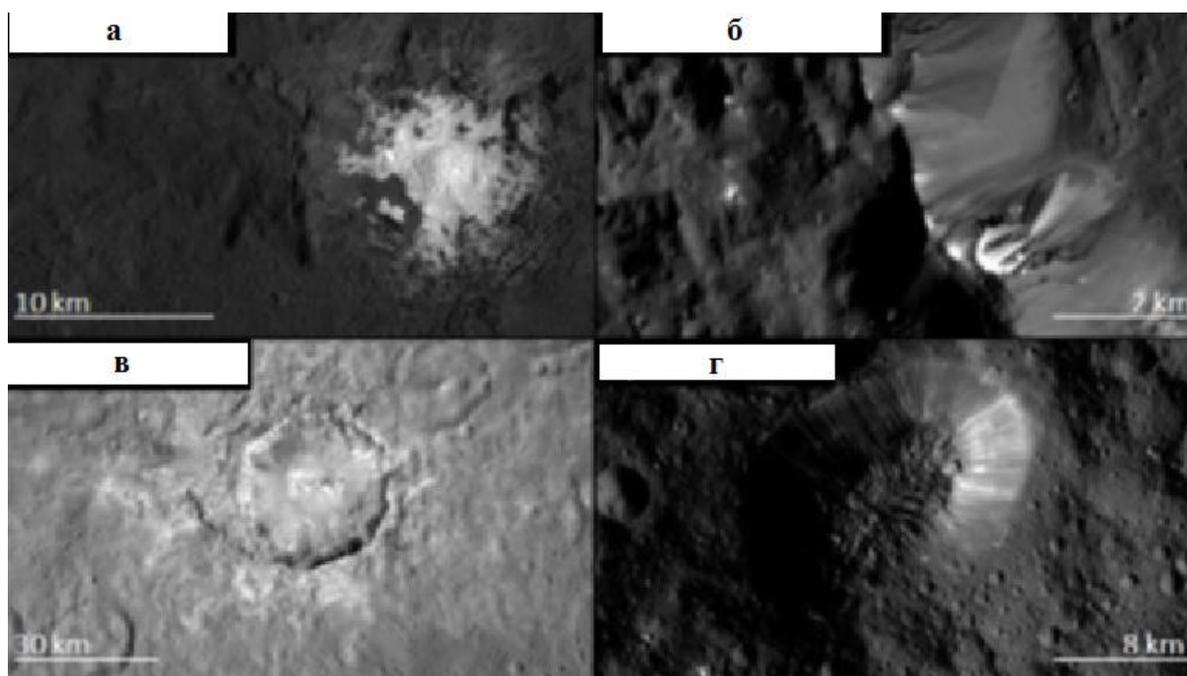


Рис. 6. Примеры типов факелов: а — факелы в центральной впадине на куполе кратера Оккатор; б — оползни или осыпания вниз на стенах кратера Данте; в — кратер Хуалани содержит факелы как в смещениях на стенах, так и на полу кратера; также он окружен ярким «одеялом» выброшенной породы; г — уникальный блок горы Ахун Монс.

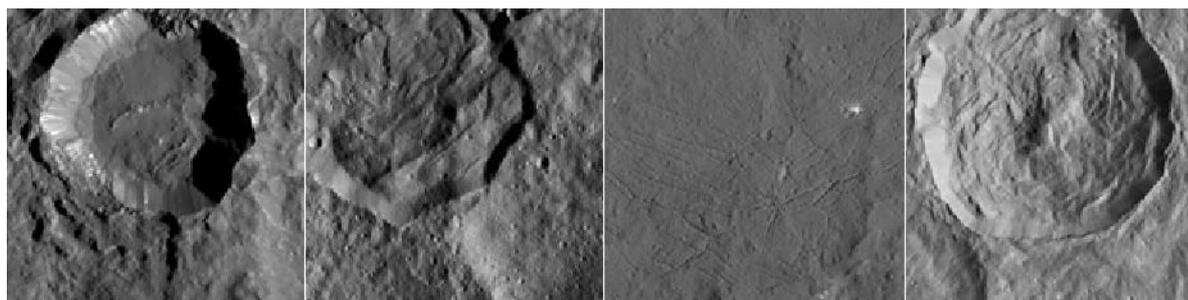


Рис. 7. Слева направо: кратеры Купало, Мессори, Данту и Цереан

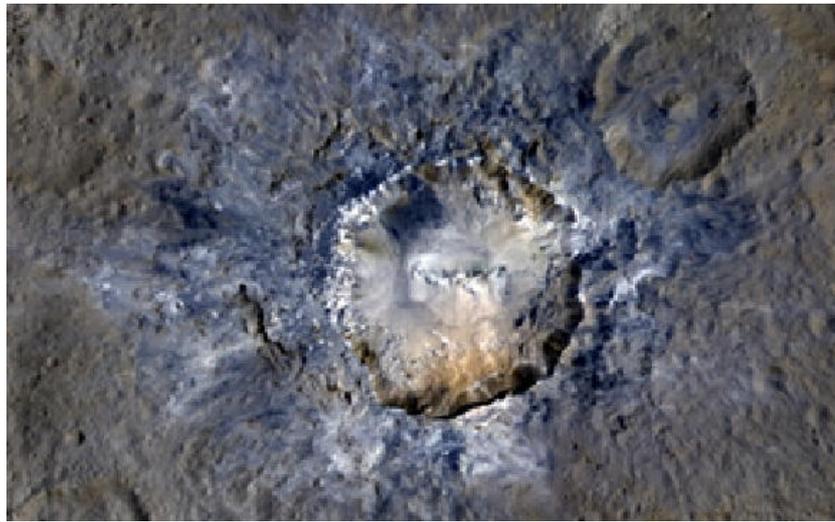


Рис. 8. Кратер Хуалани с оползнями и выбросами по периметру

Измерение распределения размеров кратеров (рис. 4) показывает, что самый старый из них образовался не более нескольких сотен миллионов лет назад. Более 30 кратеров диаметром более 75 км вообще не содержат факелов на своей подложке. Таким образом, размеры кратера меньше отвечают за наличие факелов на подложке, чем его глубина. Но и не все кратеры с глубиной более 3 км содержат факелы на подложке. Хотя, возможно, ранее факелы там и были, но со временем они исчезли с видимой поверхности.

Большие ударные структуры. Различные модели столкновений астероидов, кометных ядер и их фрагментов с телами в Солнечной системе предусматривают [7–10, 34], что для объекта с размером около 1000 км, на поверхности должно быть более 10–12 кратеров диаметром более 400 км [30, 31, 37]. Но наблюдения показывают наличие многих малых и средних кратеров и практическое отсутствие крупных. Большинство из самых крупных кратеров на Церере имеют глубину в несколько километров. И это явно не согласуется с существованием среды богатой льдом [32, 33]. Ведь наличие большого количества кратеров предполагает, что вязкость геологической среды на поверхности планеты как минимум на три порядка больше, чем она могла быть для чистого водяного льда; хотя наличие нескольких аномально мелких кратеров согласуется с ограниченной вязкой релаксацией. А это уже может указывать на пространственные вариации состава подповерхностного льда. Например, значительная яркость и сглаженность рельефа кратеров в области вокруг таких крупных ударных кратеров, как Урвара и Ялоде, является спектрально-разными, с относительно богатым аммиаком составом. Эти области контрастируют с возвышенностью на равнине Ханами, на которой находится более грубый рельеф. Там же локализована и обедненная аммиаком область, связанная с ярким материалом на поверхности.

Интересно отметить, что пространственная плотность мелких кратеров локально уменьшается на крупнейших хорошо видимых кратерах Керван и Ялоде. Предварительный анализ ландшафтов этих кратеров указывает на их возраст моложе 1–2 млрд. лет. Несмотря на практически одинаковые размеры этих больших ударных структур, их морфология сильно различается. Это могло быть вызвано либо значительной неоднородностью состава коры в местах их формирования, либо различными условиями воздействия при их образовании (например, скоростью удара о поверхность) [26]. Но наблюдения с КА «Рассвет» показали поверхность в значительной степени покрытую кратерами, их гетерогенное распределение и практическое отсутствие крупных кратеров. Морфология некоторых из них согласуется с наличием льда, что могло бы способствовать релаксации поверхности. Хотя много и кратеров с несглаженной поверхностью. Такая разная морфология кратеров показывает, что кора Цереры не является ни чисто ледяной, ни чисто скалистой. Центральные впадины характерны для кратеров диаметром > 75 км. Лучшее всего это видно на примере кратера Оккатор, где в углублении находятся большие яркие залежи с преобладанием карбонатов. Это углубление имеет диаметр ~ 9 км, глубину 600–800 м и оно окружено несимметричными массивами высотой 0,7–1,3 км. Углубление частично заполнено потрескавшимся центральным куполом диаметром около 3 км и высотой до 700 м. Это может быть связано с подкупольным уменьшением количества «криомагмы» или с замораживанием льда в грунте.

Предполагают, что самый большой кратер на Церере Керван является результатом разглаживания из-за наличия некоторого возвышения на глубине около 10 км ниже дна кратера. По величине и характеру поверхности — это ударный кратер. Его глубина ~ 5,5 км и он имеет довольно необычный топографический профиль: глубокую центральную депрессию и пологий подъем к окружающему венцу. Поэтому большая часть дна кратера находится всего на 1–2 км ниже окружающей местности. По связан-

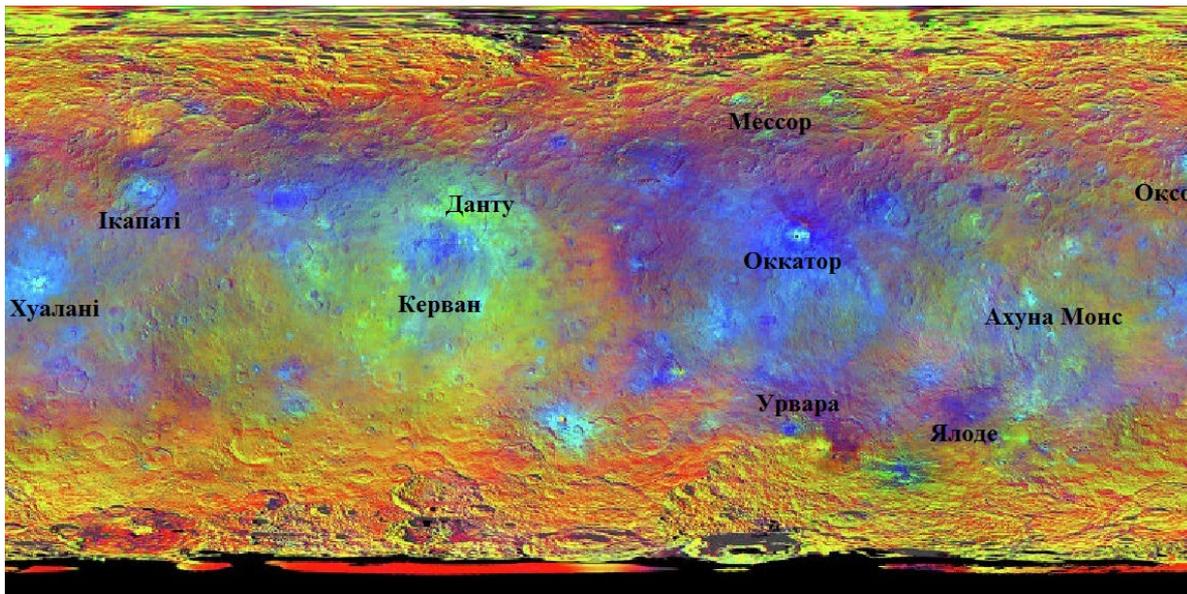


Рис. 9. Комбинированное изображение Цереры с обозначением основных морфологических особенностей

ной с кратером Керван гладкой области определен его возраст в 550–720 миллионов лет. На поверхности коры Цереры присутствует также темный материал, богатый перемешанными со льдом филлосиликатами. Выход рассола на поверхность произошел вследствие энергичного удара, существенно погашенного вязкостью подповерхностного льда; рассол поднимался в центральное углубление через трещины, а на поверхности вода испарялась и растворенные в ней вещества (карбонаты, минералы, другие соли) выпали в осадок.

4. ВЫВОДЫ

Явное отсутствие крупных кратеров диаметром > 300 км, наличие нескольких большого размера неглубоких депрессий (возможных древних ударных структур) указывает на возможность того, что эти древние кратеры теперь в значительной степени релаксировали и частично стерлись последующим кратерированием. И даже самые большие кратеры Керван и Ялоде — достаточно молодые и сравнительно невелики. По снимкам с орбитального аппарата был получен каталог ударных кратеров размером более 10 км. Оказалось, что поверхность Цереры имеет явную дихотомию (рис. 4, 9). То есть в результате столкновений за несколько миллиардов лет большая часть северного полушария оказалась сильнее усеяна кратерами, а в экваториальной области и в южном полушарии кратеров намного меньше.

Там кратеры преимущественно находятся на долготах около 180° на экваторе и в южном полушарии. Глобальный подсчет кратеров показывает серьезное уменьшение кратеров диаметром более 100–150 км по отношению к моделям и по данным на других крупных телах. Это является свидетельством того, что значительная популяция крупных кратеров была уничтожена в течение геологических масштабов времени. Вязкая релаксация топографии может быть естественным виновником наблюдаемой малочисленности крупных кратеров. Но расчеты только для водяного льда приводят к гораздо более быстрому и полному распаду топографии, чем существующие данные. Поэтому следует предположить наличие достаточно мощной коры, состоящей из смеси силикатов и различных видов солей ($< 35\%$ водяного льда по объему). Их наличие уменьшает на два-три порядка вязкость вещества в верхнем слое коры Цереры толщиной 45–90 км. Эта модель может объяснить наблюдаемый спектр топографии и отсутствие кратеров в диапазоне с размерами 300–600 км.

Более детальное рассмотрение топографии Цереры показывает наличие нескольких крупномасштабных неглубоких депрессий. Так, на поверхности Цереры присутствует огромная депрессия Вендимия (Vendimia Planitia) шириной около 800 км и глубиной до 4 км. Общая топография депрессии Вендимия совместима с ударной мегаструктурой. И это может быть признаком того, что крупные столкновения все же имели место, хотя и в далеком прошлом. Наличие депрессии такого большого масштаба имеет последствия для реологии глубокого интерьера, потенциально имея в виду переход к более высокой вязкости материалов на глубине около 200 км. Это совместимо с наличием концентрации массы к центру.

1. *Belskaya I.N., Levasseur-Regourd A.-Ch., Cellino A., et al.* Polarimetry of main belt asteroids: Wavelength dependence // *Icarus*. — 2009. — Vol. 199(1). — P.97–105.
2. *Bland M.T., Raymond C.A., Schenk P.M., et al.* Composition and structure of the shallow subsurface of Ceres revealed by crater morphology // *Nature Geoscience*. — 2016. — Vol. 9(7). — P.538–542.

3. *Buczkowski D.L., Schmidt B.E., Williams D.A., et al.* The geomorphology of Ceres // *Science*. — 2016. — Vol. 353(6303). — id.aaf4332.
4. *Carry B., Dumas C., Fulchignoni M., et al.* Near-infrared mapping and physical properties of the dwarf-planet Ceres // *Astron. Astroph.* — 2008. — Vol. 478(1). — P.235–244.
5. *Castillo-Rogez J.C., Conrad P.G.* Habitability Potential of Ceres, a Warm Icy Body in the Asteroid Belt // *Astrobiology Science Conference 2010: Evolution and Life: Surviving Catastrophes and Extremes on Earth and Beyond*, held April 26–20, 2010 in League City, Texas. LPI Contribution No. 1538. — P.5302.
6. *Chamberlain M.A., Sykes M.V., Esquerdo G.A.* Ceres lightcurve analysis—Period determination // *Icarus*. — 2017. — Vol. 188(2). — P.451–456.
7. *Churyumov K.I., Steklov A.F., Vidmachenko A.P., et al.* Observations of fragment of cometary nuclei in the atmosphere over Kiev // *Astronomical School's Report*. — 2015. — Vol. 11, №2. — P.99–102.
8. *Churyumov K.I., Steklov A.F., Vidmachenko A.P., et al.* Several twilight bolides over Kiev in 2013–2015 — fragments of comets nuclei // *Int.conf. Meteoroids 2016*, at ESTEC in Noordwijk, the Netherlands from 6–10 June 2016. Poster 63.
9. *Churyumov K.I., Steklov O.F., Vidmachenko A.P., et al.* Traces on sky: the classification and the results of regular observations of twilight fireballs // *Astronomical School's Report*. — 2014. — Vol. 10, №1. — P.37–42.
10. *Churyumov K.I., Vidmachenko A.P., Steklov A.F., et al.* Three bright bolides in Kiev sky on 29 March 2013 // *8th Conf. Meteoroids 2013*, 26–30 August 2013, Poznań, Poland. IAU C22, Session P12 Fireballs. Con. No. 077.
11. *de Sanctis M.C., Ammannito E., Raponi A., et al.* Ammoniated phyllosilicates with a likely outer Solar System origin on (1) Ceres // *Nature*. — 2015. — Vol. 528(7581). — P.241–244.
12. *de Sanctis M.C., Raponi A., Ammannito E., et al.* Bright carbonate deposits as evidence of aqueous alteration on (1) Ceres // *Nature*. — 2016. — Vol. 536(7614). — P.54–57.
13. *Ermakov A.E., Zuber M.T., Smith D.E., et al.* Evaluation of Ceres' Compensation State // *47th LPSC*, March 21–25 2016, Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1903. — P. 1708.
14. *Hiesinger H., Marchi S., Schmedemann N., et al.* Cratering on Ceres: Implications for its crust and evolution // *Science*. — 2016. — Vol. 353(303). — id.aaf4758.
15. *Jozwiak L.M., Head J.W., Wilson L.* Lunar floor-fractured craters as magmatic intrusions: Geometry, modes of emplacement, associated tectonic and volcanic features, and implications for gravity anomalies // *Icarus*. — 2015. — Vol. 248. — P.424–447.
16. *Krohn K., Jaumann R., Stephan K., et al.* Cryogenic flow features on Ceres: Implications for crater-related cryovolcanism // *Geophysical Research Letters*. — 2016. — Vol. 43(23). — P.11 994–12 003.
17. *Larson H.P., Feierberg M.A., Fink U., Smith H.A.* Remote spectroscopic identification of carbonaceous chondrite mineanalogies: applications to Ceres and Pallas // *Icarus*. — 1979. — Vol. 39(2). — P.257–271.
18. *Morozhenko A.V., Vidmachenko A.P.* On the accuracy of indirect methods for estimating the sizes of asteroids // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. — 2013. — Vol. 29(5). — P.237–242.
19. *Muironen K., Piironen J., Kaasalainen S., et al.* Asteroid photometric and polarimetric phase curves: empirical modeling // *Memorie della Societa Astronomica Italiana*. — 2002. — Vol. 73(3). — P.716–721.
20. *Parker J.W., Stern S.A., Festou M.C., et al.* Ultraviolet observations of Chiron with the HST/FOS: Examining a Centaur's gray matter // *Astron. J.* — 1997. — Vol. 113(5). — P.1899–1908.
21. *Rivkin A.S., Volquardes E.L.* Rotationally-resolved spectra of Ceres in the 3- μ m region // *Icarus*. — 2010. — Vol. 206(1). — P.327–333.
22. *Rogers A.E.E., Ash M.E., Counselman C.C.* Radar measurements of the surface topography and roughness of Mars // *Radio Sci.* — 1970. — Vol. 5(2). — P.465–473.
23. *Ruesch O., Platz T., Schenk P., et al.* Cryovolcanism on Ceres // *Science*. — 2016. — Vol. 353(6303). — id.aaf4286.
24. *Russell C.T., Raymond C.A., Ammannito E., et al.* Dawn arrives at Ceres: Exploration of a small, volatile-rich world // *Science*. — 2016. — Vol. 353(6303). — P.1008–1010.
25. *Thomas P.C., Parker J.W., McFadden L.A., et al.* Differentiation of the asteroid Ceres as revealed by its shape // *Nature*. — 2005. — Vol. 437(7056). — P.224–226.
26. *Vidmachenko A.P., Steklov A.F.* The study of cometary material on the surface of the Earth // *Astronomical School's Report*. — 2013. — Vol. 9(2). — P.146–148.
27. *Vidmachenko A.P., Vidmachenko H.A.* Is it dangerous asteroids? // *Astronomical almanac*. — 2007. — Vol. 53. — P.195–207.
28. *Vidmachenko A.P.* Sedna: the history of the discovery and its features // *Astronomical almanac*. — 2005. — Vol. 52. — P.201–212.
29. *Vidmachenko A.P.* The magnetic field of planets, satellites and asteroids // *Astronomical School's Report*. — 2012. — Vol. 8, №1. — P.136–148.
30. *Vidmachenko A.P.* Activity of processes on the visible surface of planets of Solar system // XVIII International scientific conference *Astronomical School of Young Scientists*, the program and abstracts. National Aviation University, Kyiv, Ukraine. May 26–27 2016. — P.23–27.
31. *Vidmachenko A.P.* Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies // *Astronomical School's Report*. — 2016. — Vol. 12, №2. — P.14–26.

32. *Vidmachenko A.P.* Astroblemes in Ukraine // *Astronomical almanac*. — 2016. — Vol. 63. — P.230–248.
33. *Vidmachenko A.P.* Impact craters at falling of large asteroids in Ukraine // XVIII International scientific conference *Astronomical School of Young Scientists, the program and abstracts*. National Aviation University, Kyiv, Ukraine. May 26–27 2016. — P.27–30.
34. *Vid'machenko A.P.* Settling of dust in Jupiter's atmosphere after the impact of fragments of comet Shoemaker–Levy 9 // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. — 1995. — Vol. 11(4). — P.14–16.
35. *Vidmachenko A.P.* Dwarf planets (to the 10th anniversary of the introduction of the new class of planets) // *Astronomical almanac*. — 2015. — Vol. 62. — P.228–249.
36. *Vidmachenko A.P.* The floating ices on the surface of Pluto // XVIII International scientific conference *Astronomical School of Young Scientists, the program and abstracts*. National Aviation University, Kyiv, Ukraine. May 26–27 2016. — P.10–12.
37. *Vidmachenko A.P.* Two astroblemes in Ukraine — witnesses of the last days of dinosaurs // XIX International scientific conference *Astronomical School of Young Scientists*. May 24–25 2017. The program and abstracts. Bila Tserkva, Ukraine. — P.11–13.
38. *Vidmachenko A.P.* Features of the structure of the Ceres surface // XIX International scientific conference *Astronomical School of Young Scientists*. May 2–25 2017. The program and abstracts. Bila Tserkva, Ukraine. — P.13–15.
39. *Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V.* The physical characteristics of surface Earth-like planets, dwarf and small (asteroids) planets, and their companions, according to distance studies. Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, Publishing House “Profi”, 2014 — 388 p.
40. *Vidmachenko A.P., Steklov A.F.* Where else might be life in the Solar system? // XIX International scientific conference *Astronomical School of Young Scientists*. May 24–25 2017. The program and abstracts. Bila Tserkva, Ukraine. — P.21–23.
41. *Webster W.J., Johnston K.J., Hobbs R.W., et al.* The microwave spectrum of asteroid Ceres // *Astron. J.* — 1988. — Vol. 95(4). — P.1263–1268.
42. *Wesselink A.J.* Heat conductivity and nature of the Lunar surface material // *Bull. Astron. Institut. Netherlands*. — 1948. — Vol. 10(351). — P.356–361.

Особливості будови поверхні Церери

Відьмаченко А.П.

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27

Деякі з кратерів Церери мають явно вулканічне походження, а ряд з них, можливо, є активними й зараз. Об'єкт повинен був мати набагато більше ударних кратерів, ніж там знайдено. А це означає, що поверхня Церери і зараз має сильну геологічну активність. На Церері виявлено тільки 16 кратерів діаметром більше 100 км, а найбільший кратер, басейн Керуан, сягає всього 280 км. Вважають, що лід під поверхнею Церери повільно ослаблює кору, змушуючи її згодом розгладжуватися. Досить темна поверхня Церери всяяна понад 130 яскравими плямами. Велика їх частина це, швидше за все, ударні метеоритні кратери. Виявилось, що найяскравіша пляма на Церері складається з двох великих і багатьох дрібних частин, що знаходяться в кратері Оккатор, діаметром 92 км і 4 км глибиною. Аналіз білих плям показує, що вони містять в собі солі, що сформувалися в присутності води. Це говорить про наявність гідротермальних джерел енергії і величезних покладів соди в надрах цієї карликової планети. Крім солі в утворенні цих плям брав участь і лід. Другий за яскравістю кратер Церери діаметром 6 км є Оксо. Він перебуває ніби в глибині отвору, утвореного при провалі порід у дуже великій кількості. Причому на дні кратера виявили мінерали з незвичайним хімічним складом. Найбільша гора Церери Ахуна була геологічно активною, принаймні, протягом останнього мільярда років, а можливо, активна й зараз. Утворилася ця гора в результаті кріовивержень. Існування на планеті кріовулканів підтверджує припущення про ймовірну наявність в її надрах озер із солоної води і дозволяє пояснити, яким чином ця вода досягає поверхні. Подібною геологічною активністю можна пояснити відсутність на Церері великих кратерів. Таким чином, спостереження зонда «Світанок» показують, що Церера — активний об'єкт. Наявність карбонатів на поверхні Церери вказує на те, що в її надрах існували або існують і зараз гідротермальні процеси, які викинули ці речовини на її поверхню.

Ключові слова: Церера; характеристики поверхні; морфологічна структура.

Features of the structure of Ceres surface

Vidmachenko A.P.

Main astronomical observatory of NASU, Akademika Zabolotnoho St. 27, 03143 Kyiv, Ukraine

Some of the craters on the surface of planet have a clearly volcanic origin, and a number of them may be active. The object was to have much more impact craters, than there are now. This means that the surface of Ceres is subject to strong geological activity. There were found only 16 craters larger than 100 km in diameter; the largest crater, the Keruan basin, reaches a total of 280 km. It is believed that the ice beneath the surface of Ceres weakens the bark, causing it to smooth over time. The rather dark surface of Ceres is dotted with more than 130 bright spots. Most of them are, most likely, shock meteorite craters. The brightest spot on Ceres consists of two large and many small parts, located in the crater of Okator, 92 km in diameter and 4 km in depth. An analysis of white spots shows that they contain salts formed in the presence of water. This indicates the presence of hydrothermal energy sources in the bowels of a dwarf planet. In addition to salt, ice was involved in the formation of these spots. The second brightest crater of Ceres

with a diameter of 6 km is Oxo. It is located, as it were, in the depth of the hole formed in the failure of rocks. The largest mountain of Ceres, Akhuna, has been geologically active for the last billion years, and perhaps is still active. This mountain was formed as a result of cryoeruptions. The existence of cryovolcanoes on the planet confirms the assumption about the probable presence in its bowels of reservoirs from salt water. Thus, observations of the “Dawn” probe show, that Ceres is a relatively active object. The presence of carbonates on the surface indicates that in its interior there existed, or still exist, hydrothermal processes that threw these substances onto the surface.

Keywords: Ceres; surface’s characteristics; morphological structure.

| | |
|---------------------------------|------------|
| Надійшла до редакції / Received | 28.07.2017 |
| Виправлена авторами / Revised | 27.09.2017 |
| Прийнята до друку / Accepted | 27.09.2017 |