

УДК 523.4

Особенности морфологии и геологии поверхности спутника Юпитера Европы

А.П. Видьмаченко, А.В. Мороженко, А.И. Клянчин

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины

Сравнение крупномасштабных изображений КА «Вояджер-2» и «Галилео» никаких заметных изменений поверхности Европы не показало. Но изображения Европы КА «Галилео» с высоким пространственным разрешением изменили наше представление о характере и природе ее поверхности. Поверхность представляет собой ледяную оболочку, покрытую трещинами и торосами льда. Под сравнительно тонкой оболочкой, возможно, находится океан жидкой воды глубиной до нескольких десятков километров. Очень малое количество ударных кратеров указывает на относительную молодость поверхности Европы и, возможно, на ее геологическую активность и сейчас. Основные геологические особенности спутника выделяются с учетом схожести формы, структуры, цвета, освещения и т.п. поверхности Европы и других известных типов поверхности: большие равнины (regiones), участки трещин (линий, полос) и горных хребтов (linea, lineae), области с хаотическим рельефом (хаосы — chaos, chaoses), кратеры (crater) и циклоидные трещины (flexus). По-видимому, глобальная сеть линий — это трещины в ледяной коре, вызванные тектоническими процессами и затем заполненные замерзшим темным веществом оранжево-красного цвета. Корреляция стратиграфических особенностей с альбедо позволяет предположить, что меньшее альбедо имеют относительно молодые области, которые были меньше изменены последующими эндогенными и экзогенными процессами, которые очистили бы их. Классификация кратеров базируется на четкости границ выброшенных пород. Следы ударов можно увидеть по наличию концентрических особенностей; некоторые имеют хорошо видимые края и ударную текстуру; у некоторых есть лучи. Всего на поверхности Европы найдено 41 кратер с диаметрами 2–50 км. В 2000 г. был обнаружен крупный кратер, который может быть результатом столкновения в прошлом астероида с Европой. Размер внешней структура объекта Тайр намного больше, чем размер самого кратера и имеет диаметр до 149 км. Эта морфологическая деталь оказалась настолько оригинальной, что для нее и еще для 2–3 ей подобных — пришлось предложить особенное название: большие кольцевые структуры. Если рассматривать спутник в целом, то, по нашему мнению, следует говорить о еще одной ударной очень большой кольцевой структуре, занимающей практически все полушарие Европы с центром с координатами 20S, 203W.

ОСОБЛИВОСТІ МОРФОЛОГІЇ І ГЕОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ СУПУТНИКА ЮПІТЕРА ЄВРОПИ, Видьмаченко А.П., Мороженко О.В., Клянчин А.І. — Порівняння великомасштабних зображень КА «Вояджер-2» і «Галілео» ніяких помітних змін на поверхні Європи не показало. Але зображення Європи КА «Галілео» з високим просторовим дозволом змінили наше уявлення про характер і природу її поверхні. Поверхня є крижаною оболонкою, покритою тріщинами і торосами льоду. Під порівняно тонкою оболонкою, можливо, знаходиться океан рідкої води завглибшки до декількох десятків кілометрів. Дуже мала кількість ударних кратерів указує на відносну молодість поверхні Європи і, можливо, на її геологічну активність і зараз. Основні геологічні особливості супутника виділяються з урахуванням схожості форми, структури, кольору, освітлення і т.п. поверхні Європи і інших відомих типів поверхні: великі рівнини, ділянки тріщин (ліній, смуг) і гірських хребтів, області з хаотичним рельєфом (хаоси), кратери і циклоїдні тріщини (flexus). Мабуть, глобальна мережа ліній — це тріщини в крижаній корі, викликані тектонічними процесами і потім заповнені замерзлою темною речовиною оранжево-червоного кольору. Кореляція стратиграфічних особливостей з альбедо дозволяє припустити, що менше альбедо мають відносно молоді області, які були менше змінені подальшими ендегенними і екзогенними процесами, які очистили б їх. Класифікація кратерів базується на чіткості меж викинутих порід. Сліди ударів можна побачити по наявності концентричних особливостей; деякі мають добре видимі краї і ударну текстуру; у деяких є промені. Всього на поверхні Європи знайдено 41 кратер з діаметрами 2–50 км. У 2000 р. був виявлений крупний кратер, який може бути результатом зіткнення у минулому астероїда з Європою. Розмір зовнішньої структури об'єкту Тайр набагато більший, ніж розмір самого кратера і має діаметр до 149 км. Ця морфологічна деталь виявилася настільки оригінальною, що для неї і ще для 2–3 їй подібних — довелося запропонувати особливу назву: великі кільцеві структури. Якщо розглядати супутник в цілому, то, на нашу думку, слід говорити про ще одну ударну дуже велику кільцеву структуру, що займає практично всю півкулю Європи з центром з координатами 20S, 203W.

FEATURES OF MORPHOLOGY AND GEOLOGY OF SURFACE OF JUPITER SATELLITE EUROPE, by Vid'machenko A.P., Morozhenko A.V., Klyanchin A.I. — Comparison of large-scale images of «Voyager-2» and «Galileo» did not find out no noticeable changes on the surface of Europe. But «Galileo» images of Europe with a high spatial resolution was changed our picture of character and nature of its surface. A surface is an icy shell, covered by cracks and by ice-drifts. Under a comparatively thin shell, possibly, there is an ocean of liquid water in to a few ten of kilometers depth. Very small amount of shock craters specifies on relative youth of surface of Europe and, possibly, on its geological activity and now. The basic geological features of satellite are selected taking into account likeness of form, structure, color, illuminations etc. of Europe surfaces and other known types of surface: large plains regions, areas of cracks (lines, bands) and mountain backbones (linea, lineae), areas with chaotic relief (chaos, chaoses), craters and cycloid cracks (flexus). Presumably, global network of lines — it caused by tectonic processes in icy shell cracks, after filled the frozen dark matter of orange-red color. Correlation of stratum features with albedo allows to suppose that its young areas, which were less changed by subsequent endogenous and exogenous processes which

would clean them, have less albedo. Classification of craters is based on the clearness of scopes of the thrown out breeds. Tracks of shots can be seen on the presence of concentric features; some have well visible edges and shock texture; some have rays. On the Europe surface 41 craters with diameters a 2–50 km are found. In 2000 was found out a large crater which can be the result of collision of asteroid with Europe in the past. Size of external structure of Taur object (diameter — 149 km) far more than size of its crater. This morphological detail appeared so original, that for it (and yet for 2–3 to it similar) it was necessary to offer the special name: large circular structures. If to examine satellite on the whole, to our opinion, it is necessary to talk about another shock very large circular structure occupying practically all of Europe hemisphere with a center with the co-ordinates of 20S, 203W.

Ключевые слова: морфология и геология поверхности спутника Юпитера Европа.

Key words: morphology and geology of surface of Jupiter's satellite Europe.

1. ВВЕДЕНИЕ

Новая эра не только в открытии, но и в исследованиях спутников планет-гигантов началась 4 декабря в 1973 г., когда Юпитера достиг первый КА «Пионер-10» и передал на Землю изображения окружения планеты. Телескопные наблюдения, которые проводились в течение 400 лет с поверхности Земли, обнаружили много закономерностей как в физических свойствах поверхности спутников, так и в движении, например, галилеевых спутников. Продолжительная работа первого искусственного спутника Юпитера «Галилео» по исследованию окружения этой планеты-гиганта дали возможность выполнить сравнительное изучение поверхностей отдельных спутников, а также попытаться определить изменения, которые могли произойти за два десятка лет между пролетами космических аппаратов [59].

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГАЛИЛЕЕВОМ СПУТНИКЕ ЕВРОПЕ

Согласно греческой мифологии, Европа — финикийская принцесса, похищенная Зевсом, который приняв внешность белого быка, соблазнил ее и сделал своей любовницей.

Европа была открыта Галилео Галилеем в 1610 г. с помощью изобретенного им телескопа. До этого, в 1609 г. Европу наблюдал немецкий астроном Симон Мариус, но вовремя не сообщил об этом научному сообществу. Название «Европа» впервые было предложено С.Мариусом в 1614 г., но сначала не использовалось. Галилей назвал четыре большие спутники Юпитера «планетами Медичи» и дал им порядковые номера; Европу он обозначил как «второй спутник Юпитера». Лишь в середине XX ст. название «Европа» стала общепризнанным. Орбитальные характеристики Европы таковы: большая полуось орбиты — 670900 км; перицентр — 664862 км; апоцентр — 676938 км; орбитальный период 3,551181 суток; наклон орбиты к плоскости экватора планеты составляет $0,466^\circ$. Физические характеристики: диаметр спутника 3138 км; площадь поверхности $3,09 \cdot 10^7$ км²; масса $4,80 \cdot 10^{22}$ кг; плотность 3,04 г/см³; ускорение свободного падения 1,314 м/с²; вторая космическая скорость — 2,025 км/с; средняя температура поверхности составляет 110 К на экваторе и около 50 К на полюсах. На поверхности спутника присутствует высокая радиация, поскольку орбита Европы находится в мощном радиационном поясе Юпитера. Первые снимки Европы из космоса были сделаны КА «Пионер-10», который пролетел около Юпитера в декабре 1973 г. В марте в 1979 г. Европу изучал «Вояджер-1» (минимальное приближение составляло 732000 км), а в июле — «Вояджер-2» (190000 км) (рис. 1а). Именно благодаря этим данным и была выдвинута гипотеза относительно существования жидкого океана в Европе [56]. С декабря 1995 г. по сентябрь в 2003 г. систему Юпитера изучал КА «Галилео» (рис. 1б).

Первое «близкое» свидание «Галилео» с Европой состоялось уже на его четвертом витке вокруг Юпитера 19 декабря 1996 г. Аппарат тогда приблизился к спутнику на 692 км. В соответствии с расписанием миссии «годом Европы» стал 1998 г. С ноября 1997 г. по февраль 1999 г. обращение «Галилео» вокруг Юпитера организовали таким образом, чтобы на каждом обороте (кроме 13-го) происходило сближение с Европой. Поскольку спутник Европа является одним из наиболее интересных тел в Солнечной системе, то из 35 сначала запланированных витков КА «Галилео» вокруг Юпитера 11 были предназначены специально для изучения этого спутника. Напомним, что работа станции сначала планировалась лишь до 1997 г. Однако миссия «Галилео» была продлена и полтора года в 1997–1999 гг. было отведено почти исключительно на изучение Европы. Это позволило сделать множество снимков спутника, в т.ч. с пространственной разрешающей способностью в несколько метров. В работе [46] проведено сравнение изображений с КА «Вояджер-2» с изображениями с КА «Галилео». Однако никаких заметных изменений не было обнаружено. До «Галилео» основные сведения о Европе сводились к тому, что это спутник преимущественно ледяного состава с необычайно гладкой поверхностью, порезанной сетью трещин. Но снимки КА «Галилео» с высокой пространственной разрешающей способностью в корне изменили представление о характере его поверхности и природе [23].

Многими исследователями были проведены также измерения тепловых потоков и определены яркостные температуры спутника в широком диапазоне длин волн от 8,4 мкм до 21 см [1, 4, 11, 12, 16, 28, 30, 37, 44, 45, 54]. Оказалось, что интенсивность теплового излучения подобно отражательной способности поверхности также зависит от орбитального фазового угла и не исключена возможность незначительного изменения температуры с длиной волны. Так, например, на длинах волн 8,4 и 21 мкм

они, соответственно, равны 134 ± 3 К и 121 ± 5 К. В работе [29] в длине волны 10 мкм для коэффициента тепловой инерции было получено значение 3000 ± 1000 .

Радиолокационные (РЛ) наблюдения — не многочисленные и в основном выполнены с помощью радиолокационной системы Аресибской обсерватории в длине волны 12,6 см в 1975 и в 1976 гг. [5, 6], в 1977–1979 гг. [41] и в Голдстоуне на длине волны 3,5 см [21]. Эти данные позволили оценить РЛ геометрическое альbedo A_g и степень деполяризации отраженного излучения с циркулярной $\mu_c = \sigma_{oc}/\sigma_{sc}$ и линейной $\mu_L = \sigma_{oL}/\sigma_{sL}$ поляризациями; здесь индекс «s» (same) обозначает составляющую с направлениями поляризации падающего радиолуча, а «o» (opposite) — с противоположным; σ — значение поперечного сечения тела в предположении однородной сферы. Очевидно, что эти отношения зависят от структурных и оптических характеристик поверхностного слоя, которые могут служить их определению по данным РЛ наблюдений. Они оказались несколько разными в разные годы и показывали изменения геометрического альbedo с изменением орбитального фазового угла, а степени деполяризации — с альbedo [41]. Так, по данным наблюдений Европы в 1976 г. получено, что $A_g = 0,69 \pm 0,17$ и $\mu_c = 1,61$ [6]; для средневзвешенных данных за несколько лет значение геометрического альbedo равно $0,65 \pm 0,16$, $\mu_c = 1,56 \pm 0,11$ и $\mu_L = 0,47 \pm 0,07$. По этим данным была предложена модель рефракционного рассеяния на поверхности Европы, согласно которой среда на поверхности Европы характеризуется малыми значениями коэффициентов отражения и поглощения, в среде имеются неоднородности в значениях показателя преломления, которые приводят к рефракции с поворотом радиолуча на 180° , а благодаря малому градиенту неоднородности показателя преломления — для поверхности не возникает явления полного внутреннего отражения. Таким свойствам хорошо отвечает модель ледяной поверхности, которая имеет пористую, или рыхлую поверхность с наличием квазисферических вкраплений в основную среду.

3. ОКЕАН ПОД ЛЕДЯНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Первые изображения Европы с КА [2, 3] не показали явных активных изменений поверхности. То что удалось увидеть на полученных с их помощью изображениях Европы представляет собой ледяную оболочку, покрытую трещинами и торосами — нагромождениями льда (рис. 1). Что это именно снег и лед из воды — было подтверждено многочисленными спектральными наблюдениями [35, 61]. Для объяснения этого было предложено, что отдельные льдины размером с десяток километров дрейфовали в открытой воде подобно огромным айсбергам в полярных регионах Земли. Когда такие лагуны замерзали, то начинали образовываться торосы из множества напозавших друг на друга ледяных полей. Вода, которая при этом вырывалась на поверхность, замерзала в виде абсолютно гладких ледяных полей, которые

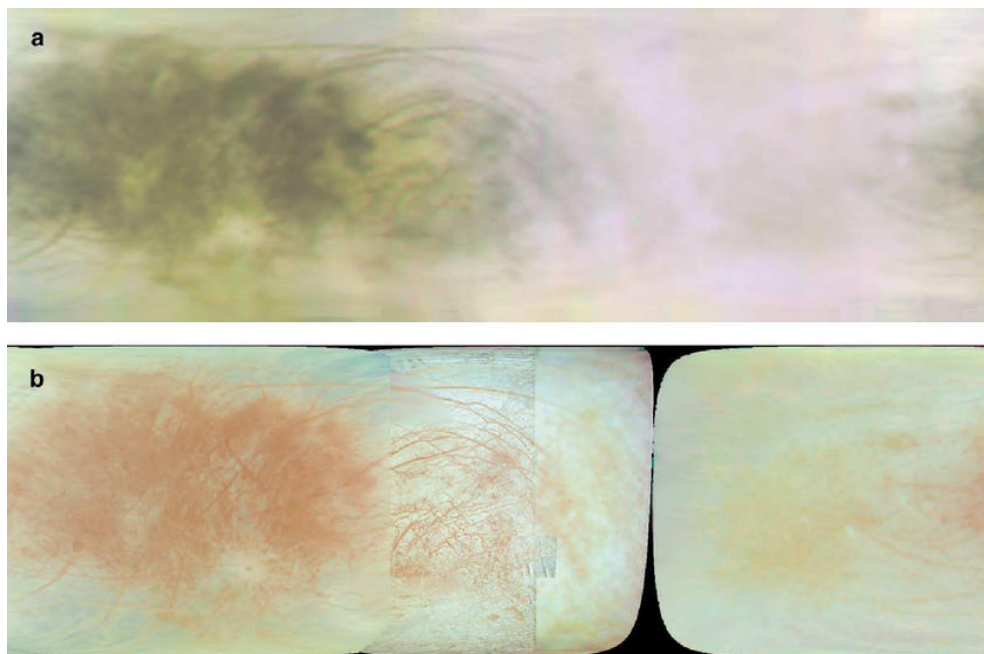


Рис. 1. а — мозаика поверхности Европы с КА «Вояджер», полученная усреднением данных в λ 615, 585 и 325 нм с пространственным разрешением 14–37 км в пикселе при фазовых углах от 3° до 10° . Точка «под Юпитером» — справа. Орбитальное лидирующее полушарие занимает правую половину мозаики и является значительно ярче и менее загрязненным «не ледяным» материалом, чем заднее полушарие. **б** — мозаика изображений Европы с КА «Галилео», полученные усреднением данных в λ 968, 560 и 413 нм с пространственным разрешением от 1,4 до 14 км в пикселе при фазовых углах от 2° до 77° . «Не ледяные» материалы Европы в действительности выглядят красными, а на лидирующем полушарии имеют желтый оттенок. [59].

особенно выделялись среди хаотического рельефа торосов. Эти особенности дополняются так называемыми куполами из материала с немного высшей температурой, который всплывал на поверхность. Судя по некоторым морфологическим образованиям на поверхности спутника можно предположить, что в отдельных районах слой его верхней литосферы не превышает нескольких километров. С другой стороны, выделенного за счет приливного механизма тепла недостаточно для такого сильного разогрева существующей там массы льда [7, 13, 27, 39, 53]. Зарегистрированные поля некоторых температурных аномалий, скорее всего, представляют выходы потоков внутренней тепловой энергии. Поэтому некоторые специалисты предлагают модель конвективного выноса тепла из разогретых недр Европы [13]. Но в этом случае конвективная область должна быть значительной по толщине. Выполненные при таких условиях расчеты привели к выводу, что под сравнительно тонкой литосферой, возможно, находится океан жидкой воды глубиной до нескольких десятков километров. Ломка льда и образование торосов из поверхностных льдов, вероятно, происходят и в настоящее время.

Размеры и средняя плотность Европы позволяют сделать предварительные выводы о доле льда в общей массе спутника. При диаметре 3138 км и средней плотности $3,04 \text{ г/см}^3$ Европа должна быть обогащена водой в сравнении, например, с Луной и Ио. Уже первые выполненные оценки говорили о толщине чисто ледяной оболочки около 100 км. Гравитационные измерения, проведенные аппаратурой станции «Галилео», также подтвердили дифференциацию Европы, у которой есть твердое ядро и водно-ледяной покров толщиной около 100 км [2]; хотя последующие уточнения привели к более скромным цифрам. Например, значение так называемого безразмерного момента инерции Европы составляет $0,346 \pm 0,005$. Оно существенно меньше 0,4, характерного для сферически однородного шара. Такое различие указывает на значительную концентрацию массы в направлении к центру Европы, что может быть объяснено, например, трехслойной структурой: с железным, или с легированным серой железом ядром в его центре, с безводной скальной мантией и затем слоем H_2O . Толщина такого внешнего слоя H_2O должна быть в пределах 100 км для большего металлического ядра и с меньшей плотностью мантии. Некоторые тепловые модели спутника указывают на то, что существенная часть слоя водяного льда могла бы быть жидкой и сегодня [40, 56]. Если это так, то возможный объем воды превысил бы земные океаны.

Геологический анализ наблюдательных данных указывает на присутствие теплого мобильного материала (а, возможно, и жидкой воды), светлого на небольших глубинах в коре, который открылся во время его недавней геологической деформации. По изображениям с КА «Галилео» удалось обнаружить очень низкую плотность ударных кратеров, что указывает на то, что поверхность Европы относительно молода и, возможно, геологически активна и сегодня [8, 64]. До миссии «Галилео» рассматривались лишь две конкурирующие модели внутренней структуры Европы [53]. В одной модели Европа состоит из безводного скалистого ядра с плотностью Ио или Луны, окруженного ледяной корой из H_2O (лед и жидкая вода), толщиной больше 100 км. В другой модели, значительное количество воды в Европе должно сохраняться в гидратированных силикатах, окруженных тонким ледяным слоем. Ограничения на эти модели перед полетом КА «Галилео» накладывали среднее значение плотности Европы и то, что ее поверхность в значительной степени состоит из водяного льда. Тепловые модели Европы подбирались для возможности объяснить существование жидкого водного океана под ледяной корой. Стандартные аккреционные и радиогенные источники тепла являются достаточными для того, чтобы обезводить Европу на ранней стадии ее эволюции, оставив лишь над слоем жидкой воды слой замерзшего льда до 100 км.

Современное значение эксцентриситета орбиты Европы может давать выход тепла в результате приливных механизмов около $25\text{--}50 \text{ мВт/м}^2$, который может поддерживать конвекцию в коре толщиной 10–30 км [40, 56, 58]. Теплопроводность льда зависит от температуры и его физического состояния (плотности, наличия трещин и т.п.) Так, присутствие теплоизолирующего слоя на поверхности Европы говорило бы о стабилизации жидкого водного океана [56]. Добавка к жидкому океану, например, соли [31, 35] и аммиака [13] существенно изменяет реологию льда и температуру замерзания океана. Возможно, что связанное с приливами и отливами периодическое нагревание ледяной коры предотвращает полное промерзание океана [63]. То есть лежащий под поверхностью мобильный материал может быть или жидкой водой, или ропой, или же теплым суперэластичным льдом [51, 43, 19, 20]. Модельные исследования показывают, что при выходе таких веществ на поверхность спутника с температурой 100 К размер образуемых там частиц из льда составит около 1 мм [40].

Согласно новым оценкам считается, что глубина океана составляет несколько десятков километров, а ледяной панцирь может иметь толщину всего несколько километров. Такая оболочка очень хрупкая и под действием перемещающегося приливного выступа может трескаться, создавая доступ жидкой воды к безатмосферной поверхности спутника. Скорее всего, именно по этой причине удалось зарегистрировать несколько «султанов» извержений водяного (метанового и возможных других химических элементов) пара с поверхности Европы [17, 46], которая спустя некоторое время оседала на поверхность спутника

Таблица 1. Амплитуды колебаний поверхностей ледяных галилеевых спутников Юпитера с океаном (в скобках — без океана)

Спутник	Амплитуда
Европа	~ 20 – 30 м (~ 60 см)
Ганимед	~ 3 – 4 м (~ 20 см)
Каллисто	~ 2 – 3 м (~ 10 см)

в виде снега и инея. Как показывают расчеты, связанная с приливами амплитуда колебаний поверхности существенно зависит от присутствия океана под поверхностью. Как видно из табл. 1, амплитуда приливной волны на Европе с океаном может составлять ~ 30 м, а без океана — < 1 м.

Возможно наилучшим индикатором внутреннего состояния Европы и признаком наличия жидкого океана являются данные, полученные с помощью магнитометра КА «Галилео». Поскольку галилеевы спутники погружены в мощную магнитосферу Юпитера, то измерения, например, в окружении Европы показали связанные со спутником быстрые и систематические изменения, которые нельзя было объяснить лишь с помощью внутреннего поля, индуцируемое динамо-механизмом, подобным существующему на Земле. Вместо этого подповерхностный слой Европы должен был вести себя как некоторый электрический проводник, отвечающий на вариации магнитного поля Юпитера генерацией собственного магнитного поля. Согласно полученным данным, такой подповерхностный проводник должен иметь проводимость такую же, как и соленая морская вода. О наличии жидкого океана говорит также структура магнитного поля Европы. Так, во время пролета на расстоянии 351 км над поверхностью спутника магнитометр КА «Галилео» регистрировал изменения магнитного поля спутника таким образом, что можно с уверенностью говорить о существовании проводника электрического тока под видимой поверхностью, например, соленого океана [52].

4. МОРФОЛОГИЯ ДЕТАЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ СПУТНИКА

Геологическая история Европы представлена деталями на её поверхности. После миссии «Вояджера» были выделены основные геологические черты спутника. Для этого по снимкам поверхности Европы подбирались различные схожие формы, структура, цвет, освещение и т.п. [22]. В работе [14] на поверхности Европы было предложено выделить такие главные морфологические типы: *большие равнины* (regiones), участки *трещин* (линий, полос) и *горных хребтов* (linea, lineae), области с *хаотическим рельефом* (хаосы — chaos, chaoses) и *кратеры* (crater). К началу 2011 года к ним добавлено еще и такие особенности как *flexus*, представляющие собой так называемые циклоидные трещины (рис. 2). Происхождение их остается непонятным. Все отмеченные особенности интерпретированы как те, которые происходят от образования тектонических разломов с резкими границами и от криовулканизма; некоторые из них управляются внешними причинами, а другие — появляются в результате падения крупных метеороидов. Причем тектоническое повторное всплывание материала коры превалирует над геологическими особенностями образованными давно. В то же время, отсутствие значительного количества ударных кратеров на поверхности спутника [8, 36] указывает на то, что степень повторного тектонического всплывания заметно уменьшилась, возможно, сразу же после того, как состоялось образование основного «морщинистого» равнинного рельефа. Эти тенденции и переход от древней тектоники к доминированию криовулканического всплывания могли быть приписаны постепенному утолщению криосферы Европы в течение последней геологической истории около 30 млн. лет: сначала толстая ледяная оболочка ломалась, а затем плавилась в результате приливной деятельности и эндогенных процессов; причем степень ломки и вес ледяных пластов уменьшались со временем, а их очертания становились все уже и все ощутимее сглаживались; образование областей хаоса могли происходить там, где порог толщины для выдерживающей высокую нагрузку конвекции был превышен, и это привело к формированию более пластичного льда из-за связанного с приливами нагревания. В этом контексте пока еще не ясно, вызвано ли все это разовыми резкими изменениями в тепловой эволюции спутника, или же это циклические, или нерегулярные эпизоды тектонической и криовулканической деятельности [14].

Длинные, узкие горные хребты с протяжностью от нескольких единиц до нескольких сотен километров наблюдались около терминатора еще на изображениях переданных КА «Вояджер» [34]. А изображения КА «Галилео» с высоким разрешением показали их сложную структуру (рис. 3). Большинство горных хребтов оказались линейными (рис. 1,3) хотя некоторые из них — показывают циклоидные структуры (рис. 2). Горные хребты — наиболее распространенная деталь поверхности на Европе. И большинство моделей, которые их объясняют указывают на присутствие на определенной глубине значительных количеств жидкой воды. Нередко на поверхности Европы наблюдаются *двойные* и даже *тройные ледяные хребты*. Есть там и *полосы с темными краями*, которые объясняются специфическим явлением *криовулканизма* (извержением воды из-под льда в центре трещин). Явлениями криовулканизма объясняют также и наличие отдельных темных пятен — малых и больших (как участки извержения на поверхность ледяного льда и, возможно, воды).

На рис. 3а видны два хребта разного возраста. Сравнительно молодые топографические структуры на Европе, в основном приподняты на 100–150 м относительно преимущественно равнинного окружения [38]; а благодаря связанным с приливами процессам [25] поверхность Европы может изменяться [40]; по этой же причине следует также говорить о присутствии океана под твердой ледяной оболочкой [32]. Самым заметным проявлением присутствия океана является деформация поверхности в виде особенностей, известных как полосы (рис. 4а,б). Обычно их длина доходит до 30 км. Часто они могут быть связаны с *горными хребтами*; иногда они пересекаются другими полосами, показывая изменение со временем. Чем младше полосы, тем они темнее, показывая «загрязненность» не ледяными компонентами [17]; старшие полосы — преимущественно более яркие. Хотя бывает и наоборот. Например, на рис. 4а показано присутствие трех типов структурных особенностей [18]: это часть широкой темной полосы на основном сером фоне [51], которую пересекает светлая полоса с резкими краями [49, 57]. Такая светлая стратиграфическая особенность является самой молодой в данном регионе [35, 48, 49, 59]. Ширина темной полосы составляет ~18 км и она более, чем на 100 м приподнимается над окружающей фоновой поверхностью. А яркая полоса уже возвышается над уровнем темной еще метров на 200 двумя резкими хребтами, тогда как середина этой яркой особенности — углублена на 120–150 м (рис. 4). Расстояние между краями светлой альбедной полосы составляет около 4 км.

Для объяснения существования набора таких морфологических деталей предлагаются два следующих модельных представления. Так, если ледяная оболочка тонкая (до 2 км), то самый жизнеспособный механизм для образования ленточной топографии — это присутствие пористых разломов (до 20% по объему) в ледяном панцире. Если же ледяная оболочка значительно толще (до 20 км), то для образования такой же топографии необходимо допустить, что нагревание продолжается и сегодня. То есть, поскольку разного типа полосы имеют разный возраст [14, 47, 48], то для объяснения этого факта необходимо привлекать современное активное нагревание в недрах некоторых трещин в верхней части коры Европы [38, 49]. Поэтому прослеживается связь между горными хребтами и полосами если допустить, что горные хребты — показывают места внутреннего нагрева. По-видимому, глобальная сеть линий — это трещины в толстой ледяной коре, вызванные тектоническими процессами. Эти разломы не сопровождаются движениями коры, а сами трещины заполняются замерзшим темным веществом оранжево-красного цвета (см. рис. 1). Ширина разломов на разных частях поверхности составляет от единиц до сотен километров, а их протяженность иногда достигает 3000 км и даже больше. Вода, которая выливается, мгновенно за-

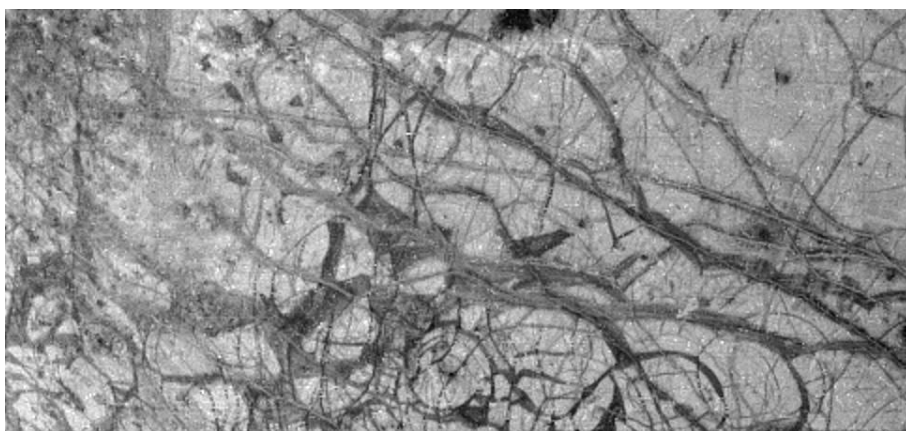


Рис. 2. Сеть круговых трещин (циклоид) в экваториальной части Европы на снимке «Галилео» 02.06.1996 напоминает льды полярной шапки Земли. (Регион размером 360 × 770 км с разрешением 1,6 км/пиксел). (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

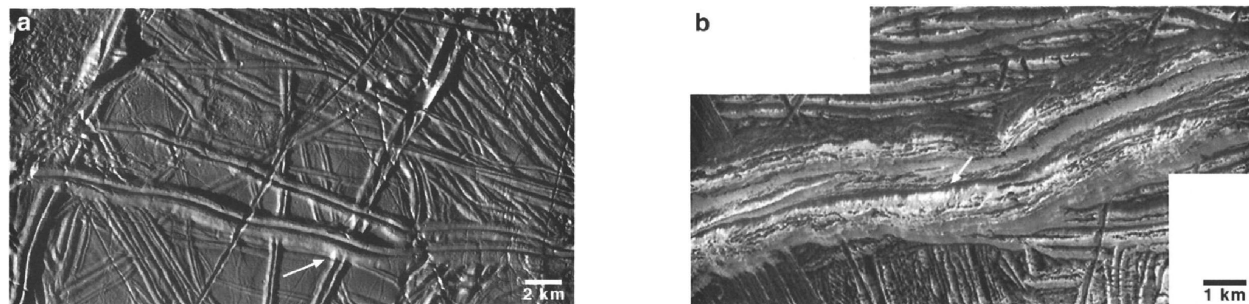


Рис. 3. Вид горных хребтов на Европе. **а** — двойные горные хребты, которые пересекают равнины. Стрелкой показано перекрещивание молодого горного хребта со старшим при вертикальном масштабе рельефа в 200 м. **б** — двойной хребет проходит по серой равнине (6 м/пиксель). Стрелкой показан темный материал, который лежит внизу посередине вдоль хребта [42].

кипает и сразу же замерзает; некоторая ее испарившаяся часть выпадает на поверхность в виде снега и инея в радиусе нескольких сотен километров от источника. Отметим, что такое кипение забирает очень много тепла и в условиях Европы слой льда в 0,5 м образуется всего за несколько минут. Подобная схема формирования поверхностного слоя подтверждается высокой яркостью поверхности (чистый свежий иней и лед) и спектральными измерениями, которые часто указывают на водяной лед почти без примесей. Таким образом, стратиграфические исследования с использованием изображений КА «Галилео» с высокой разрешающей способностью показывают, что самые старые особенности поверхности представляют собой «сморщенные» равнины, перекрещенные полосы и и хребтоподобные равнины и имеют наивысшее альбедо. А самые молодые особенности — намного темнее. Другие особенности на поверхности имеют промежуточные значения яркости.

Отметим наличие некоторых исключений из этого очевидного правила с возрастом: например, ленточная структура «Agenor Linea» в значительной степени серого цвета, но имеет узкую очень яркую часть вдоль центра. Однако таких деталей очень мало.

Эта общая корреляция стратиграфических особенностей с альбедо позволяет предположить, что на изображениях поверхности Европы меньшее альбедо имеют относительно молодые области, которые были меньше изменены последующими эндогенными и экзогенными процессами, которые очистили бы их. Многочисленные изображения поверхности Европы с разным пространственным разрешением свидетельствуют, что, например, пятно «Astalia Macula region» является одной из самых темных и самых красных особенностей на поверхности, и, возможно, потому она молодая, сформированная относительно недавно. Противоположные стороны темных с резкими кромками и серых так называемых линейных структур на Европе могут быть ассоциированы с разломами в коре, заполненными жидкостью, или «теплым» льдом [3, 57, 60]. Линейные структуры часто показывают двустороннюю симметрию горных хребтов и желобов, предполагая повторное растрескивание и выливание жидкости. Самые заметные представители таких морфологических особенностей расположены в пределах области на поверхности, расположенной вокруг точки «анти-юпитер». Наименьшие размеры этих крупномасштабных областей составляют около 4 км, указывая, скорее всего, на подобную, или меньшую глубину до так называемого «мобильного» материала [33], как это видно и по аналогии с земным морским льдом [22]. Такие трещины с излияниями показывают, что их края достаточно резкие и некоторые из них — с ярким ободком.

На сегодняшний день рассматривают три основные модели образования этих хребтов и поочередное их сочетание между собой: 1) горные хребты представляют линейные структуры вещества вынесенного на поверхность взрывным вулканизмом вдоль разломов коры; 2) горные хребты представляют линейные структуры, созданные боковым давлением периодически открывая и закрывая разломы и выжимая материал к поверхности в виде жидкой глины, теплого льда и жидкости; то есть, они образуются в результате нарастания льда вдоль кромок открывающихся и закрывающихся трещин; 3) горные хребты представляют линейные структуры существующие давно, которые временами покрываются новым «выдавленным» из глубины материалом. То есть, во всех случаях для объяснения моделей образования горных хребтов требуется присутствие жидкой воды, водных ледяных смесей и «теплого» льда, который деформируется.

Другими интересными областями рельефа Европы есть так называемые *хаосы*, в которых малые

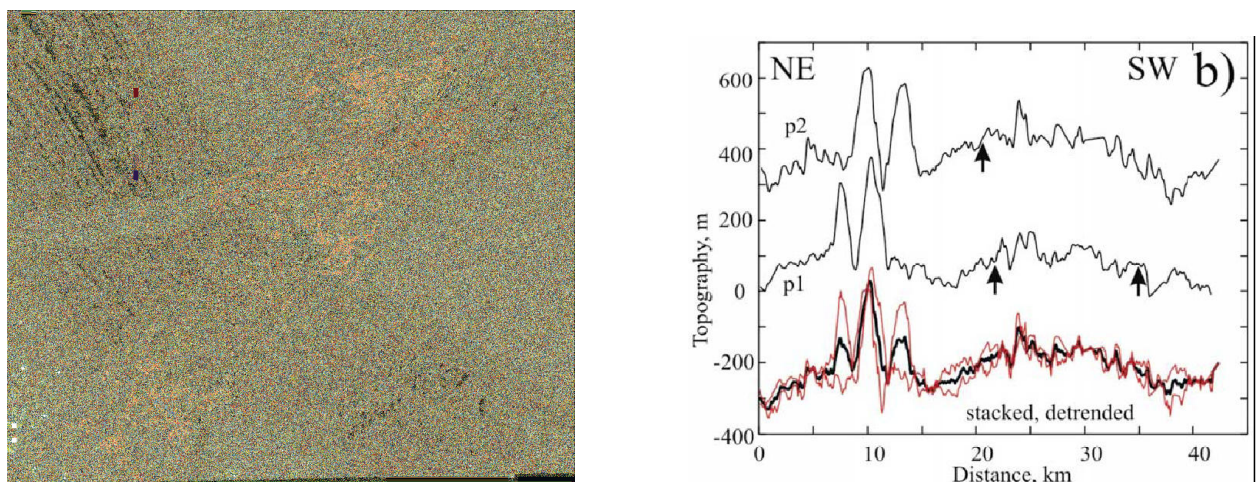


Рис. 4. **а** — изображение поверхности Европы с КА «Галилео» с разрешением 70 м/пиксель [49]. **б** — поперечный разрез яркой полосы по линиям p1 и p2. Жирная темная линия внизу — усредненный профиль; тонкие линии — это средне-квадратичное отклонение σ . Стрелками обозначен приблизительный край темной полосы (профиль p2 имеет лишь одну стрелку, потому что другой край полосы неуверен). Неопределенность по вертикали — около 20 м; по горизонтали — 800 м. [38]

остатки айсбергов от ранее расколотых горных хребтов будто сталкиваются и напозаюют один на другой. Если предположить, что эта область сформировалась тогда, когда подповерхностная вода выходила сквозь ледяной блок и потом опять быстро замерзала, то аналогия с айсбергом может быть полной. Другая возможность заключается в том, что одна, или несколько поднимающихся колонн более теплого льда нагревали поверхностный лед, создавая мокрую смесь льда и жидкости, в которой сломанные и смещенные блоки льда могли свободно скользить под действием гравитации. В любом случае существование хаотичного рельефа говорит о теплых недрах спутника и хотя бы о частичном таянии там льда. Как раз на изображениях с КА «Галилео» было обнаружено, что некоторые части относительно темной, «пятнистой» местности Европы состоят из хаотических структур [7], обычно составленных из многоугольных блоков на существующих ранее хребтоподобных равнинах. Причем хаосы могут быть или в низинах, или же быть приподнятыми над окружающими равнинами [9, 10]. Например, в Хаосе

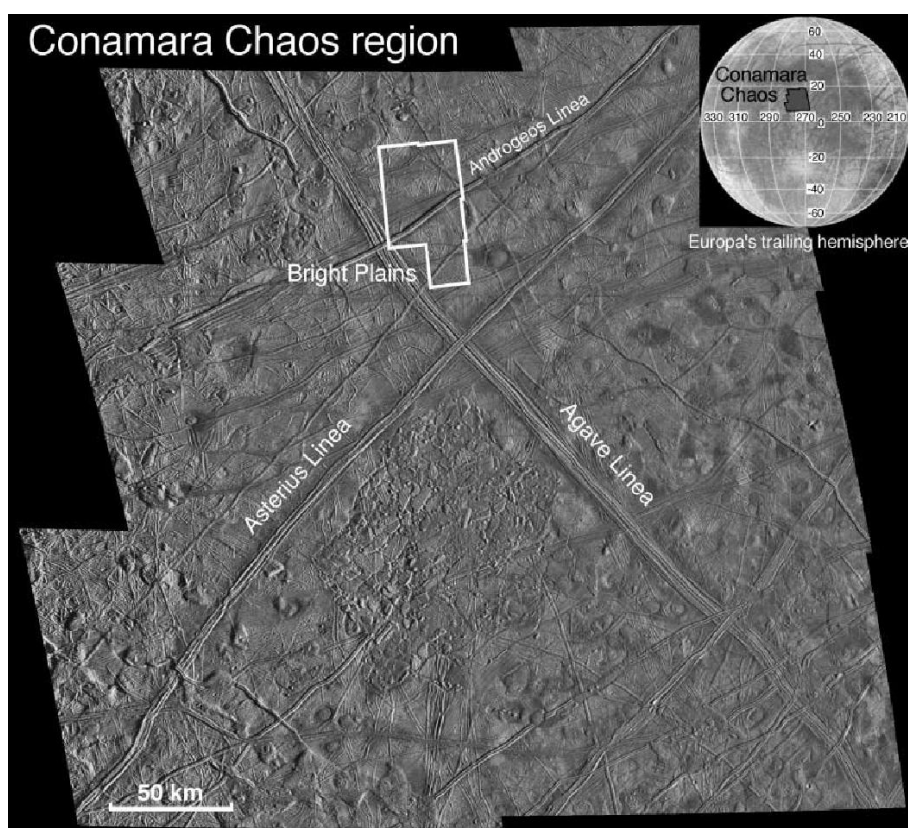


Рис. 5. Изображение с КА Галилео региона Хаос Конамара в масштабе 180 м/пиксель (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

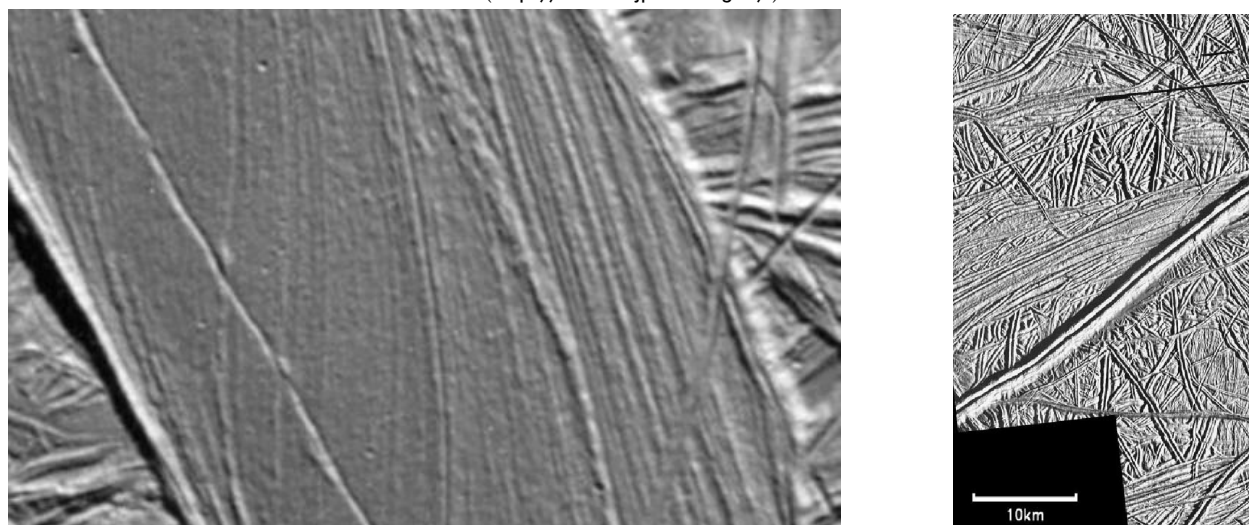


Рис. 6. Слева — снимок участка южной полярной части Европы получен КА «Галилео» 26.09.1998 из расстояния 4200 км. Справа — изображение мозаики области Яркие Равнины с разрешением около 20 м/пиксел. Хребет через центр — Androgeos Linea (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

Конамара (Conamara) (рис. 5) до 60% существующей ранее местности было заменено на новую [55].

То есть такие структуры, как хаосы, кажутся стратиграфично молодыми [23, 47, 55] и могут быть интерпретированы, как области повышенных выходов тепла, а то и возможного полного местного подтаивания поверхности Европы [26]. Из предположения, что ледяные блоки хаосов когда-то плавали в жидкости, толщина льда в месте расположения расплавленного или жидкого материала в Хаосе Конамара может составлять около 4 км [62].

Приведенный на рис. 6 (слева) снимок южной полярной области Европы покрывает территорию 24 16 км. Структура в центре фото скорее всего образовалась в результате движения навстречу друг другу двух плит на поверхности и последующего заполнения трещин между ними веществом из недр спутника. Об этом говорят длинные линии на поверхности образования, которые появлялись при постепенном поступлении вещества на поверхность и ее затвердении. Детальный анализ хребтов, разломов и темных полос подтвердил, что их противоположные стороны в очень многих случаях абсолютно подобные. Они часто имеют центральное углубление и определенную степень симметрии (рис. 6, справа). Расчеты показывают, что для того, чтобы сформировать такие структуры, подповерхностный лед Европы должен быть достаточно подвижным и теплым. Геологически старая и гладкая поверхность передана на изображениях на рис. 6 светлыми тонами и состоит практически из чистого водяного льда.

Полагают, что образования тройных хребтов происходит по следующей схеме. На первом этапе в результате приливных деформаций в ледяном панцире образуется трещина, края которой «дышат», разогревая окружающее вещество. Вязкий лёд внутренних слоёв расширяет трещину и поднимается вдоль неё к поверхности, загибая её края в стороны и вверх. Выход вязкого льда на поверхность образует центральный хребет, а загнутые края трещины — боковые хребты. Эти геологические процессы могут сопровождаться разогревом вплоть до плавления локальных областей и возможных проявлений криовулканизма. То есть, такой процесс может быть медленным и постепенным, но не исключено, что трещины образуются внезапно.

Еще одним свидетельством наличия жидкой (или мягкой) внутренней субстанции есть отсутствие больших перепадов рельефа поверхности спутника [63]. Например, на полученном КА «Галилео» в августе 1999 г. изображении показана поверхность спутника с областями Тера и Трейс (рис. 7) около 80 км шириной каждая. Отдельные участки этих поверхностей будто бы периодически распадались на части, а затем опять соединялись. Эти темные (красно-коричневого цвета) части рельефа практически не содержат чистого льда и, по-видимому, является следствием совсем недавней геологической активности. Светло-голубые части изображения отвечают участкам рельефа, покрытым тонко-зернистым льдом, а темно-голубые — грубо зернистым. Длинные темные линии — это гребни и трещины в поверхности.

Область Тера имеет размеры приблизительно 70×85 км и немного приподнята над окружающей поверхностью. Несколько обломков ярких ледяных плит находится внутри этого образования и они выглядят будто оторванными от края какой-то хаотической структуры. Их неровные обрывистые края говорят о скорости процесса их разрушения при образовании. Пятно Тера показывает морфологию, типичную для зарождающегося ледника: большое приподнятое плато в нижней (южной) части изображения имеет резко обрывающийся край и у его подножья расположены темные (красноватые) депозиты, в виде выпуклостей-айсбергов и потоковых наплывов в нижней части. При их образовании не требуется обязательного появления жидкого слоя, а достаточно появления там всего лишь мягкого, гибкого ледяного слоя. В противовес этому, область Трейс выглядит удлинённой и практически не возвышается над окружающей территорией. Оно также показывает наличие некоторых выпуклостей, преимущественную хаотическую местность и четкую окантовку из красных депозитов, подобных до Пятна Тера. Однако вместо резких обрывающихся краев наблюдаются мягкие потоковые наплывы на соседнюю ярко-синюю поверхность. Видно, что область Трейс внизу граничит с так называемой линейной структурой Либия (Libya), и немного ее затемняет. На некоторых крупномасштабных снимках видны куски льдин, которые вмерзли в «младшее» ледяное поле. Причем эти льдины ранее, скорее всего, образовывали единую структуру, но потом они будто «разъезжались» и опять возвращались назад. Это может указывать на то, что куски льда двигались в жидкости.

Так, приведенная на рис. 5 мозаика поверхности с хаотичным рельефом Конамара показывает относительно недавнее переформатирование поверхности, в результате которого ледные блоки разных форм будто сдвинуты со своих мест и затем возвращены назад; некоторые даже перевернуты и потом частично погружены в материал из жидкой воды и расплавленного загрязненного льда. Наличие трещин, которые пересекают эту поверхность поверх хаотичной структуры говорит о том, что вся поверхность была опять заморожена в сплошную поверхностную кору. На рис. 8 представлен снимок Европы, на котором хорошо заметны темные (в действительности — красновато-коричневые) пятна и выпуклые образования, разбросанные среди хребтов.

Отметим, что некоторые из них в углублениях имеют очень яркие ядра поперечником около 6 км. Они преимущественно находятся в северном полушарии спутника, имеют средние размеры около 10 км

и называются «лентикулами» (*lenticulae* в переводе с латинского — «веснушки»). Они могут образоваться в результате процессов, аналогичных лавовым излияниям, когда под действием внутренних сил теплый расплавленный лед поднимается из нижней части поверхностной коры вверх, а холодный лед, погружаясь оседает вниз. Поэтому «веснушки» — могут являться еще одним доказательством присутствия жидкого, теплого океана под поверхностью. Некоторые из пятен (круглые, или эллиптические) имеют вид куполов, другие — ям, третьи — гладкие, а остальные — сложную структуру. Сходство по размеру и размещению ям, куполов и пятен свидетельствуют, что они генетически связаны (рис. 8). Вершины *куполов* подобны частям старых равнин, покрытых холмами. Это говорит о том, что купола сформировались выдавливанием вверх из нижних горизонтов высокопластичных пород вследствие так называемое явление диапиризма. На поверхности оно представляет собой куполо- или валообразные складки с интенсивно смятым ядром. При неравномерном распределении давления пластический материал нагнетается из одних участков в другие, образуя характерные «раздувы» — ядра нагнетания.

В других случаях этот материал полностью прорывает толщу вышележащих пород и формирует ядра протыкания, которые создают обширное семейство разнообразных диапировых складок. Поэтому разнообразие форм «веснушек» можно объяснить, если предположить, что лед Европы ведет себя как крупные (хотя и разного размера) ячейки «теплого» льда, поднимающиеся сквозь более холодный приповерхностный ледяной шар.

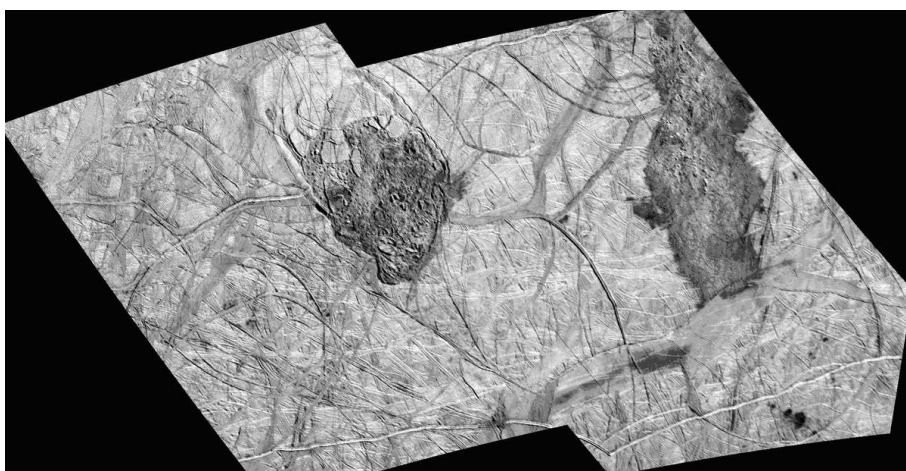


Рис. 7. Тера и Трейс — это два темных красноватых пятна на поверхности Европы. Показана территория 525 × 300 км. Север — сверху. (<http://www2.jpl.nasa.gov/>).

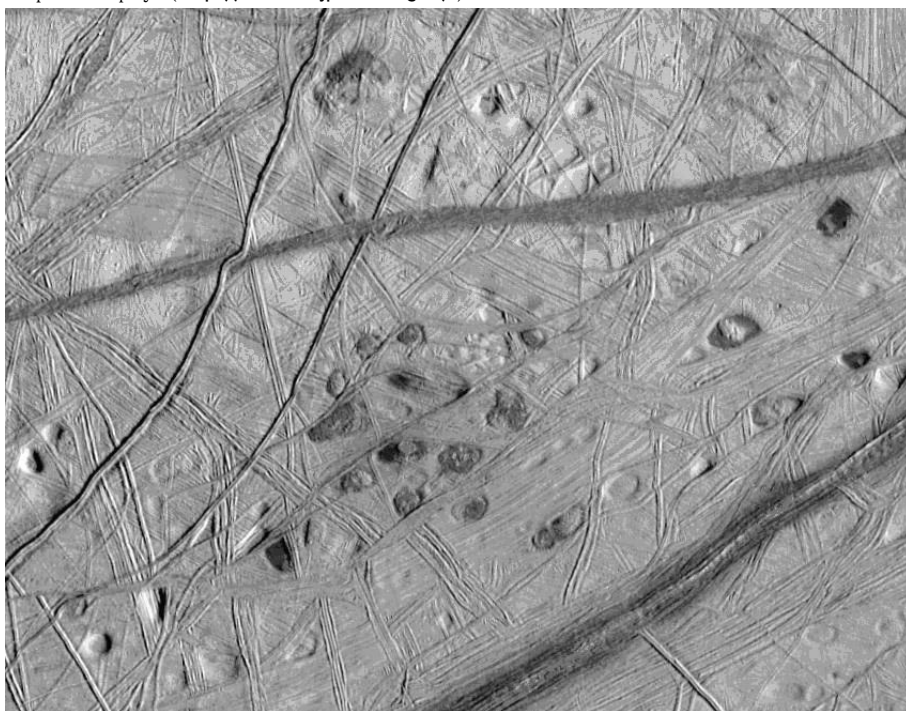


Рис. 8. Красноватые пятна «веснушек» на поверхности Европы. Изображение получено КА «Галилео» во время сближения 31.05.1998. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)

Области с грубой структурой могут быть местами, где такие же ячейки разрушались и разрушались равнины на поверхности. При этом гладкие темные участки могли быть залиты растаявшей водой, принесенной с ячейками теплого льда и опять быстро замерзшей. Такие ячейки теплого льда могут образовываться в случае, если ледяные блоки Европы плавают над жидкой водой; при этом, рассеяние приливной энергии приводит к нагреву основы блока, где температура близка к температуре таяния льда, и тогда лед становится очень пластичным. Теплый лед — менее плотный, чем лежащий выше него холодный, и потому стремится подняться вверх. Если ледяной блок достаточно толстый, то архимедова сила может преодолеть вязкое сопротивление (которое уменьшается с глубиной) и блок начнет всплывать вверх. Модельные оценки показывают, что для этого лед должен быть как минимум толщиной в 20 км [42].

В настоящее время природа темных пятен на поверхности Европы и темного вещества во многих бороздах пока до конца не ясны. Считается, что такой цвет и спектр может давать сульфат магния и/или содержащие серу соединения. Источником этих веществ могут быть вулканы Ио, недра Европы и даже метеориты; возможно, также, что это растворенные в океане под корой Европы соли. На многочисленных изображениях с высокой пространственной разрешающей способностью светлые образования на поверхности Европы показывают, что большая часть поверхности покрыта изморозью. Причем светлые участки с чистым водяным льдом в основном находятся на вершинах хребтов и на их крутых склонах. Например, средняя часть линейной структуры Агенор (Agenor Linea) представляет собой очень яркую ледяную поверхность Европы (рис. 9) Тогда как остальные похожие хребты и ленточные области — значительно более темные.

Темный материал, который возможно состоит из силикатных смесей и гидратированных солей, может откалываться и накапливаться в долинах между хребтами в виде осадочных пород (см. рис. 3, 4, 6). Агенор — достаточно плоское не хребтовое образование. Лишь несколько маленьких кратеров можно наблюдать как на самой структуре, так и вокруг нее. Агенор пересекают несколько узких трещин и эта структура густо «засеяна» лентиклами. Неровная хаотичная область окружает Агенор снизу и сверху и немного разрушила его края. Если раньше считали, что Агенор является очень молодым образованием на поверхности Европы, то данные, представленные на изображениях рис. 9 является свидетельством того, что это не совсем так.

5. УДАРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ЕВРОПЕ

На изображениях Европы с КА «Галилео» в 2000 г. был обнаружен достаточно крупный кратер, который может быть результатом столкновения в прошлом кометного ядра, или же астероида с Европой. В настоящий момент он представляет собой яркое круглое пятно с диаметром около 80 км. Обычно классификация кратеров базируется на чёткости их границ и выброшенных «продуктов»: во многих случаях, следы от ударов можно распознать по присутствию концентрических очертаний, а некоторые — имеют хорошо сохранившиеся края и хорошо видимую ударную текстуру; у некоторых есть лучи [8, 36, 64]. Всего на Европе было найдено 41 кратер с диаметрами 2–50 км [36]. На рис. 10 можно сравнить четыре наиболее характерные ударные структуры. Их названия по часовой стрелке от верхнего левого

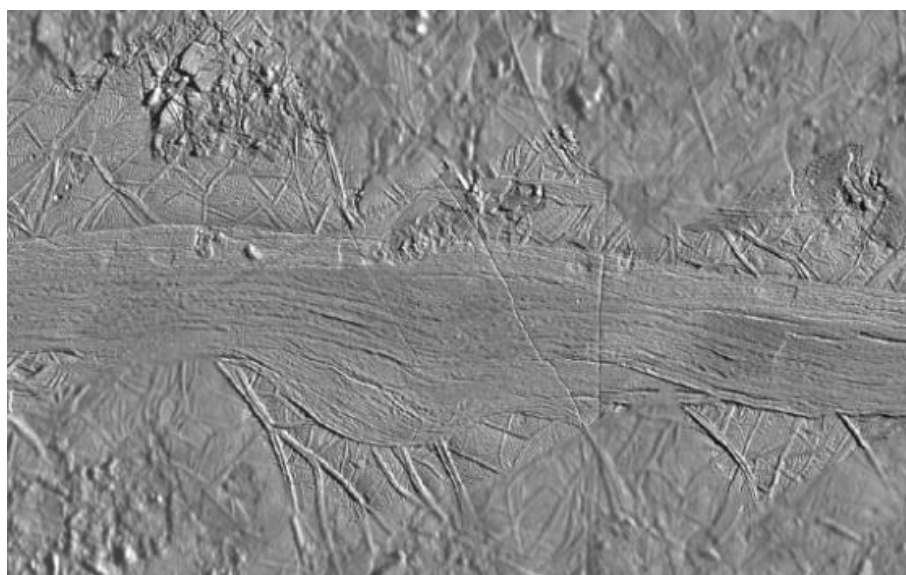


Рис. 9. Линейная структура Агенор. Север сверху. Территория 130 × 95 км, разрешающая способность 50 м/пиксел. Снимок получен 26.09.1998 с расстояния 5000 км. Центр изображения находится на 44° ю.ш. и 219° з.д. (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

угла звучат так: Пвилл (Pwill), Циликс (Cilix), Тайр (Tyge) и Маннаннан (Mannannan). Эти ударные структуры имеют диаметры больше 18 км и являются достаточно старыми.

Центральная гора кратера Пвилл заметно выше (на 600 м) его краев. Это может свидетельствовать о выходе на поверхность мягкого льда или воды через пробитое метеороидом отверстие. Он имеет чёткую границу и хорошо различимую ударную область. На поверхности вокруг кратера найдены также загадочные темные пятна. Возможно, они образовались в результате полного расплавления поверхностного слоя приливами внутреннего океана. Края кратера имеют высоту в разных местах от 300 до 530 м при диаметре 26 км. Выходит, что центр кратера возвышается над краями, и это делает его одним из самых необыкновенных в Солнечной системе. Выброшенное при ударе вещество легло вокруг краев и имеет приблизительно такой же топографический уровень, что и подножье самого кратера. На первых фотографиях этой области с низким пространственным разрешением было видно, что вещество при ударе было разбросано на сотни километров от эпицентра удара. Считается, что это темное вещество вокруг кратера было выброшено с глубины в несколько километров.

Кратер Циликс имеет диаметр около 18 км (находится 2S, 180W). Его края поднимаются на 400–500 м над поверхностью. Особенностью кратера является наличие двух пиков в середине кратера, один из которых достигает 280 м, а второй еще на 100 м больше. Дно кратера имеет куполообразную форму и образовалась она после самого события. В пониженных топографических областях наблюдается очень темный материал, формируя частичный ров вокруг юго-восточной части кратера.

Кратер Маннаннан имеет двоякую широкую кольцевую структуру высотой около 300 м и набор нескольких возвышенностей в центральной области кратера с высотами от 180 до 350 м. Особенно необычным является Тайр (в переводе — Колесо). Внешняя структура этого объекта намного больше, чем сам кратер и имеет диаметр до 149 км. Возможно, Тайр образовался после удара о поверхность спутника крупного астероида. Концентрические кольца показывают достаточно молодой рельеф в этой области. Кратеры немного меньших размеров вокруг этой области сформировались из больших осколков породы, выбитой при основном ударе Тайра.

По одной из гипотез тело, которое сформировало эту поверхность, могло вообще пройти сквозь поверхностную кору в менее хрупкие более глубокие слои, где и состоялся основной подрыв, от эпицентра которого распространилась ударная волна. В то же время для Пвилла, Циликса и Маннаннана — кратеры хорошо видно и на поверхности спутника. По-видимому ударные тела в результате этих событий не прошли далеко сквозь поверхность. Это могло быть в том случае, если падающее тело было малым, или менее плотным в сравнении с поверхностными породами в районе Тайра; или же кора здесь намного тоньше, чем в других областях. Снимок Тайра на рис. 10 покрывает область размером ~214 км и его анализ показывает, что сначала состоялось столкновение с поверхностью, которое привело к образованию этой круглой структуры. Последующим событием стало выделенное темными линиями образования,

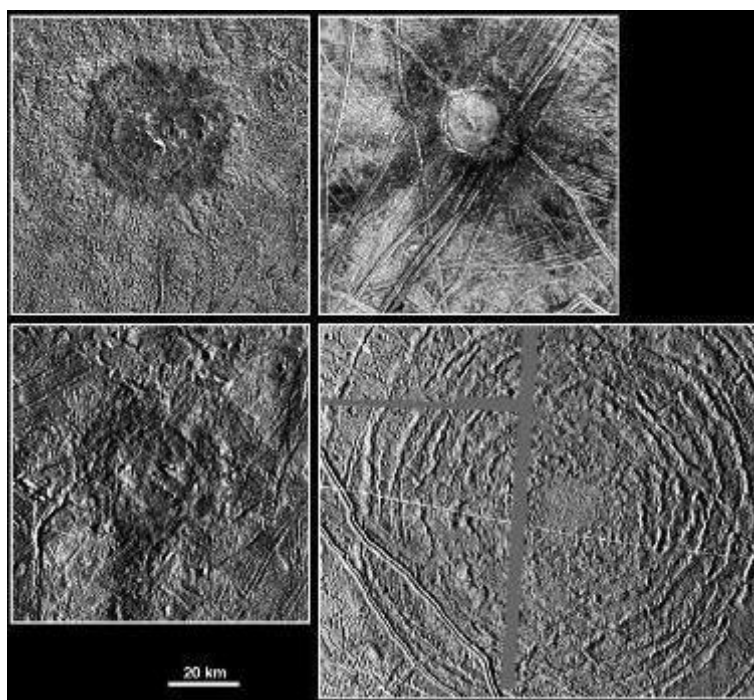


Рис. 10. Изображение четырех крупнейших ударных кратеров Европы. Пвилл был сфотографирован 16 декабря 1997 г., Циликс — 31 мая 1998 г., Тайр и Маннаннан — 29 марта 1998 г. (<http://www2.jpl.nasa.gov/>)

которые покрывают область удара. Равнинные области показывают возможные области выхода загрязненного водяного льда. Хорошо заметны, также, хребты, которые появились уже после образования кратера. Спектральные данные этой области показали, что центр ударной структуры является областью сформированной из грубого зернистого льда.

Таким образом, морфологическая деталь Тайр оказалась настолько оригинальной, что для нее и еще для 2–3 ей подобных — пришлось даже предложить отдельный термин: *большие кольцевые структуры* (БКС) (Large ringed feature). Так, несколько меньшие размеры (107 км) имеет БКС Callanish. А на рис. 11 показана возможная *очень большая кольцевая структура*, занимающая практически все полушарие Европы.

В подтверждение того, что это именно ударная структура говорит расположение на поверхности Европы в диаметрально расположенных точках двух наиболее выделяющихся трещин — Agenor и Agenor twin (близнец) [24]. Если к ним добавить еще и регион трещины Kattreus, то симметрия центра глобальной ударной структуры (Agenor + Kattreus) и противоположного к ней отклика на удар (Agenor twin) будет практически идеальной (рис. 12).

6. ВЫВОДЫ

Сравнение крупномасштабных изображений с КА «Вояджер-2» и «Галилео» никаких заметных изменений не обнаружило и не показало явных активных изменений поверхности Европы. Но снимки КА «Галилео» с высокой пространственной разрешающей способностью позволили предположить, что под сравнительно тонкой литосферой (при средней толщине чисто ледяной оболочки менее 100 км),

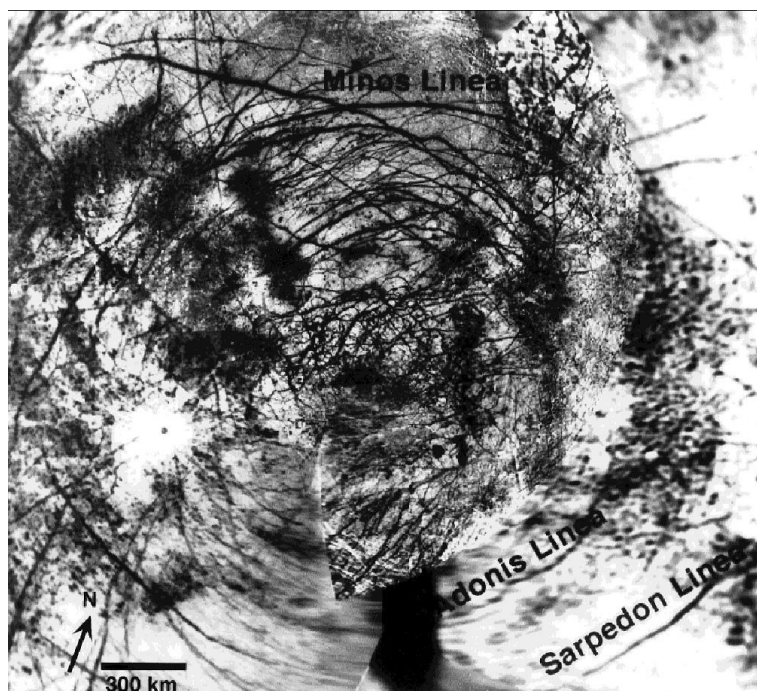


Рис. 11. Мозаика изображений с КА «Вояджер» и «Галилео» в стереографической проекции с центром возможной большой кольцевой структуры в точке с координатами 20S, 203W [23].

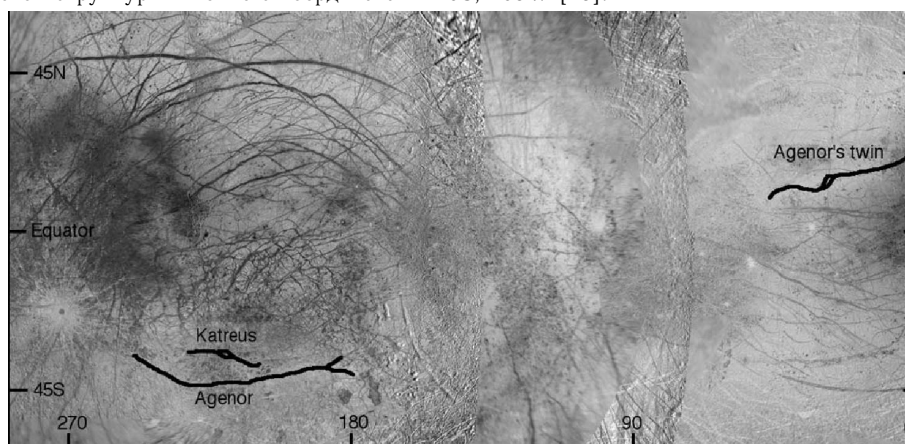


Рис. 12. Расположение глобальной ударной структуры «Agenor+Kattreus» диаметрально напротив Agenor [24].

возможно, находится океан жидкой воды глубиной до нескольких десятков километров. Ломка льда и образование торосов из поверхностных льдов, вероятно, происходят и в настоящее время. Скорее всего, именно по этой причине удалось зарегистрировать несколько «султанов» извержений водяного (метанового и возможных других химических элементов) пара с поверхности Европы, которая спустя некоторое время осела на поверхность спутника в виде снега и инея.

Геологический анализ наблюдательных данных указывает на присутствие теплого мобильного материала, светлого на небольших глубинах в коре, который открылся во время его недавней геологической деформации. По изображениям удалось обнаружить очень низкую плотность ударных кратеров, что указывает на относительную молодость поверхности Европы и, возможно, на ее геологическую активность и сегодня. Основные геологические черты спутника были выделены после миссии «Вояджер» с учетом схожести формы, структуры, цвета, освещения и т.п. поверхности Европы и других известных типов поверхности: большие равнины (regiones), участки трещин (линий, полос) и горных хребтов (linea, lineae), области с хаотическим рельефом (хаосы — chaos, chaoses) и кратеры (crater). К началу 2011 года к ним добавлено еще и такие особенности как flexus, представляющие собой так называемые циклоидные трещины. Тектоническое повторное всплывание материала коры превалирует над геологическими особенностями образованными давно.

Было отмечено, что самые молодые материалы покрывают старшие группы и морщинистые равнины, хребтоподобные детали. Отсутствие значительного количества ударных кратеров на поверхности спутника указывает на то, что степень повторного тектонического всплывания заметно уменьшилась, возможно, сразу же после того, как состоялось образование основного «морщинистого» равнинного рельефа. Эти тенденции и переход от древней тектоники к доминированию криовулканического всплывания могли быть приписаны постепенному утолщению криосферы Европы в течение последней геологической истории около 30 млн. лет. В этом контексте пока еще не ясно, вызвано ли все это разовыми резкими изменениями в тепловой эволюции спутника, или же это циклические, или нерегулярные эпизоды тектонической и криовулканической деятельности. По-видимому, глобальная сеть линий — это трещины в ледяной коре, вызванные тектоническими процессами и затем заполненные замерзшим веществом оранжево-красного цвета. Ширина разломов на разных частях поверхности составляет от единиц до сотен километров, а их протяженность иногда достигает 3000 км и даже больше. Вода, которая выливается, мгновенно закипает и сразу же замерзает; некоторая ее часть испарившись выпадает на поверхность в виде снега и инея в радиусе нескольких сотен километров от источника.

Корреляция стратиграфических особенностей с альбедо позволяет предположить, что на изображениях поверхности Европы меньшее альбедо имеют относительно молодые области, которые были меньше изменены последующими эндогенными и экзогенными процессами, которые очистили бы их. Хаосы кажутся стратиграфично молодыми и могут быть интерпретированы, как области повышенных выходов тепла, а то и возможного местного подтаивания поверхности Европы. Обычно классификация кратеров базируется на чёткости их границ и выброшенных «продуктов»: следы от ударов можно распознать по присутствию концентрических очертаний, а некоторые имеют хорошо сохранившиеся края и хорошо видимую ударную текстуру, у некоторых есть лучи. Всего на Европе найдено 41 кратер с диаметрами 2–50 км. На изображениях Европы с КА «Галилео» в 2000 г. был обнаружен достаточно крупный кратер, который может быть результатом столкновения в прошлом астероида с Европой. В настоящий момент он представляет собой яркое круглое пятно. Внешняя структура объекта Тайр намного больше, чем сам кратер и имеет диаметр до 149 км. Концентрические кольца показывают достаточно молодой рельеф в этой области. По одной из гипотез тело, которое сформировало эту поверхность, могло вообще пройти сквозь поверхностную кору в менее хрупкие более глубокие слои, где и состоялся основной подрыв, от эпицентра которого распространилась ударная волна. Таким образом, морфологическая деталь Тайр оказалась настолько оригинальной, что для нее и еще для 2–3 ей подобных — пришлось даже предложить отдельный термин: большие кольцевые структуры (БКС).

А если рассматривать из разных ракурсов весь спутник, то, по нашему мнению, следует выделить еще одну *очень большую кольцевую структуру*, занимающую практически все полушарие Европы с центром с координатами 20S, 203W. В подтверждение того, что это именно ударная структура, говорит наличие на поверхности Европы в диаметрально расположенных точках двух наиболее выделяющихся трещин — Agenor и Agenor twin (близнец). Если к ним добавить еще и регион трещины Kattreus, то симметрия центра глобальной ударной структуры (Agenor + Kattreus) и противоположного к ней отклика на удар (Agenor twin) будет практически идеальной.

1. Берлин А.Б., Есепкина Н.А., Зверев Ю.К. Наблюдения галилеевых спутников Юпитера на Ратан-600 // Письма в Астрон. журн. — 1976. — Т.2, № 8. — С. 405–409.
2. Anderson J.D., Schubert G., Jacobsen R.A., et al. Europa's differentiated internal structure: Inferences from four Galileo encounters // Science. — 1998. — **281**. — P. 2019–2022.

3. *Belton M.J.S., Head J. W. III, Ingersoll A.P., et al.* Galileo's first images of Jupiter and the Galilean satellites // *Science*. — 1996. — **274**. — P. 377–385.
4. *Berge G.L., Nuhleman D.O.* Callisto — Disk temperature at 3.71-centimeter wavelength // *Science*. — 1975. — **187**. — P. 441–443.
5. *Campbell D.B., Chandler J.F., Pettengill G.H., Shapiro I.I.* Galilean satellites of Jupiter — 12.6-centimeter radar observations // *Science*. — 1977. — **196**. — P. 650–653.
6. *Campbell D.B., Chandler J.F., Ostro S.J., et al.* Galilean satellites — 1976 radar results // *Icarus*. — 1978. — **34**. — P. 254–267.
7. *Carr M.H., Belton M.J.S., Chapman C.R., et al.* New evidence for a global ocean on Europa // *Nature*. — 1998. — **391**. — P. 363–365.
8. *Chapman C.R., Merline W.J., Bierhaus B., et al.* Cratering in the Jovian system: Intersatellite comparisons // *Lunar Planet. Sci. Conf.* — 1998. — XXIX. — Abstract 1927.
9. *Chuang F.C., Kadel S.D., Klemaszewski J.E., et al.* Europa: Geomorphologic mapping and stereo analysis of chaos regions southeast of the Tyre multi-ringed impact structure // *Eos Trans. AGU*, 79. — 1999. — Fall Meet. Suppl. — Abstract. — F540–F541.
10. *Collins G.C., Denk T., Fagents S., et al.* Does Europa have a subsurface ocean? Evaluation of the geological evidence // *Journal of Geophysical research*. — 1999. — **104**, № E10. — P. 24,015–24,055.
11. *De Pater I., Brown R.A., Jaffe W.J., Berge G.L.* Radio emission from Io // *Astrophysical Journal*. — 1982. — **261**. — P. 396–401.
12. *De Pater I., Brown R.A., Dickel J.R.* VLA observations of the Galilean satellites // *Icarus*. — 1984. — **57**, № 1. — P. 93–101.
13. *Deschamps F., Sotin C.* Thermal convection in the outer ice I shell of icy satellites, in *The Jovian System After Galileo: The Saturnian System Before Cassini-Huygens* // *Lab. de Geophys. et Planttol.* — 1998. — Nantes, France. — 51 p.
14. *Figueredo P.H., Greeley R.* Resurfacing history of Europa from pole-to-pole geological mapping // *Icarus*. — 2004. — **167**, № 1. — P. 287–312.
15. *Figueredo P.H., Greeley R.* The emerging resurfacing history of Europa from pole-to-pole geologic mapping. In: *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* — 2003. — 34th, Lunar and Planetary Institute, Houston. Abstract 1017.
16. *Forrest W.J., Houck J.R., McCarthy J.F.* The 16- to 38-micron spectrum of Callisto // *Icarus*. — 1980. — **41**, № 2. — P. 340–342.
17. *Geissler P.E., Greenberg R., Hoppa G., et al.* A recently active lineament on Europa? // *Lunar Planet. Sci. Conf.* 1998. — XXIX. — Abstract 1904.
18. *Giese B., Oberst J., Roatsch T., et al.* The Local Topography of Uruk Sulcus and Galileo Regio Obtained from Stereo Images // *Icarus*. — 1998. — **135**, № 2. — P. 303–316.
19. *Goldsby D.L., Kohlstedt D.L.* Flow of Ice I by dislocation, grain boundary sliding, and diffusion processes // *Abstract. — Lunar Planet. Sci. Conf.* — 1997. — XXVIII. — P. 429–430.
20. *Goldsby D.L., Kohlstedt D.L.* Grain boundary sliding in fine-grained ice I // *Scr. Mater.* — 1997. — **37**. — P. 1399–1406.
21. *Goldstein R.M., Green R.R.* Ganymede — Radar surface characteristics // *Science*. — 1980. — **207**. — P. 179–180.
22. *Greeley R., Coon M., Sullivan R., et al.* Terrestrial sea ice processes: Considerations for Europa // *Icarus*. — 1998. — **135**, № 1. — P. 25–40.
23. *Greeley R., Sullivan R., Klemaszewski J., et al.* Europa: Initial Galileo Geological Observations // *Icarus*. 1998. — **135**, № 1. — P. 4–24.
24. *Greenberg R.* The evil twin of Agenor: tectonic convergence on Europa // *Icarus*. — 2004. — **167**, № 2. — P. 313–319.
25. *Greenberg R., Geissler P., Hoppa G., et al.* Tidal-Tectonic Processes and Their IMPLICATIONS for the Character of Europa's Icy Crust // *Reviews of Geophysics*. — 2002. — **40**, Issue 2. — P.1.
26. *Greenberg R., Hoppa G., Tufts R., Geissler P.* Chaos regions: Widespread melt-through to the surface of Europa? // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 1998. — **30**. — P.1086.
27. *Greenberg R., Geissler P.E., Hoppa G., et al.* Tectonic processes on Europa: Tidal stresses, mechanical response, and visible features // *Icarus*. — 1998. — **135**, № 1. — P. 64–78.
28. *Hansen O.L.* Infrared Observations of the Galilean Satellites // *Bulletin of the American Astronomical Society*. — 1972. — **4**. — P.367.
29. *Hansen O.L.* Ten-Micron Eclipse Observations of Io, Europa, and Ganymede // *Icarus*. — 1973. — **18**, № 1. — P. 237–241.
30. *Johnson T.V., Mosher J.A., Soderblom L.A.* Galilean satellite multispectral data base production // In *NASA. Washington Rept. of Planetary Geology Program*. — 1983. — P. 259–260.
31. *Kargel J.S.* Brine volcanism and the interior structures of asteroids and icy satellites // *Icarus*. — 1991. — **94**, № 2. — P. 368–390.
32. *Kivelson M.G., Khurana K.K., Russell C.T., et al.* Galileo magnetometer measurements: A stronger case for a subsurface ocean at Europa // *Science*. — 2000. — **289**. — P. 1340–1343.
33. *Leith A.C., McKinnon W.B.* Is there evidence for polar wander on Europa? // *Icarus*. 1996. — **120**, № 2. — P. 387–398.
34. *Lucchitta B.K., Soderblom L.A.* The geology of Europa. — In: *Morrison, D. (Ed.), Satellites of Jupiter*. Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ. — 1982. — P. 521–555.

35. McCord T.B., Hansen G.B., Matson D., et al. Hydrated salt minerals on Europa's surface from the Galileo near-infrared mapping spectrometer (NIMS) investigation // J. Geophys. Res. — 1999. — **104**. — P. 11827–11851.
36. Moore J.M., Asphaug E., Belton M.J.S., et al. Impact Features on Europa: Results of the Galileo Europa Mission (GEM) // Icarus. — 2001. — **151**, Issue 1. — P. 93–111.
37. Morrison D., Cruikshank D.P., Murphy R.E. Temperatures of Titan and Galilean satellites at 20 microns // Astrophys. J. — 1972. — **173**, № 3, Pt2. — P. L143–L146.
38. Nimmo F., Pappalardo R.T., Giese B. On the origins of band topography, Europa // Icarus. — 2003. — **166**, № 1. — P. 21–32.
39. Ojakangas G.W., Stevenson D.J. Polar wander of an ice shell on Europa // Icarus. — 1989. — **81**, № 1. — P. 242–270.
40. Ojakangas G.W., Stevenson D.J. Thermal state of an ice shell on Europa // Icarus. — 1998. — **81**, № 1. — P. 220–241.
41. Ostro S.J., Campbell D.B., Pettengill G.H., Shapiro I.I. Radar observations of the icy Galilean satellites // Icarus. — 1980. — **44**, № 2. — P. 431–440.
42. Pappalardo R.T., Belton M.J.S., Breneman H.H., et al. Does Europa have a subsurface ocean? Evaluation of the geological evidence // J. Geophys. Res. — 1999. — **104**, № E10. — P. 24015–24055.
43. Pappalardo R.T., Sullivan R.J. Evidence for separation across a gray band on Europa // Icarus. — 1996. — **123**, № 2. — P. 557–567.
44. Pauliny-Toth I.I.K., Witzel A., Preuss E. Measurements of the flux density of weak radio sources at frequencies of 2.7 and 10.7 GHz // Astronomy and Astrophysics. — 1974. — **35**, № 3. — P. 421–428.
45. Pauliny-Toth I.I.K., Witzel A., Gorgolewski S. Observations of Ganymede and Callisto at 1.3 CM wavelength // Astronomy and Astrophysics. — 1977. — **58**, № 3. — P. L27–L28.
46. Phillips C.B., McEwen A.S., Hoppa G.V., et al. The search for active resurfacing on Europa and Io // Bull. Am. Astron. Soc. — 1998. — **30**. — P. 1085.
47. Prockter L.M., Antman A., Pappalardo R.T., et al. Europa: stratigraphy and geologic history of an anti-jovian region from Galileo E14 SSI data // J. Geophys. Res. — 1999. — **104**. — P. 16531–16540.
48. Prockter L.M., Head J.W., Pappalardo R.T., et al. Geological mapping of central Agenor Linea, Europa (212°–226°) // Lunar Planet. Sci. Conf. — 1999. — XXX. Abstract 1299.
49. Prockter L.M., Head J.W., Pappalardo R.T., et al. Morphology of European bands at high resolution: a mid-ocean ridge-type rift mechanism // J. Geophys. Res. — 2002. — **107**. — 10.1029/2000JE001458.
50. Prockter L.M., Pappalardo R.T., Sullivan R., et al. Morphology and evolution of European bands: Investigation of a seafloor spreading analog // Lunar Planet. Sci. Conf. — 1999. — XXX. — Abstract 1900.
51. Schenk P.M., McKinnon W.B. Fault offsets and lateral crustal movement on Europa: Evidence for a mobile ice shell // Icarus. — 1989. — **79**, № 1. — P. 75–100.
52. Schilling N., Neubauer F.M., Saur J. Influence of the internally induced magnetic field on the plasma interaction of Europa // J. Geophys. Res. — 2008. — **113**. — No A3. — P. 3203–3206.
53. Schubert G., Spohn T., Reynolds R.T. Thermal histories, compositions, and internal structures of the moons of the Solar System, in Satellites. — (Edited by J. A. Burns and M. S. Matthews). — 1986. — Univ. of Ariz. Press, Tucson. — P. 224–292.
54. Sinton W.M. The thermal emission spectrum of Io and a determination of the heat flux from its hot spots // Journal of Geophysical Research. — 1981. — **86**. — P. 3122–3128.
55. Spaun N.A., Head J.W., Collins G.C., et al. Conamara Chaos Region, Europa: Reconstruction of mobile polygonal ice blocks // Geophys. Res. Lett. — 1998. — **25**. — P. 4277–4280.
56. Squyres S.W., Reynolds R.T., Cassen P., Peale S.J. Liquid water and active resurfacing on Europa // Nature. — 1983. — **301**. — P. 225–226.
57. Sullivan R., Greeley R., Homan K., et al. Episodic plate separation infill on the surand fracture face of Europa // Nature. — 1998. — **391**. — P. 371–372.
58. Thomas P.J., Schubert G. Crater relaxation as a probe of Europa's interior // Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 16th, Part 2. J. Geophys. Res. 1986. — **91**, suppl. — P. D453–D459.
59. Tiscareno M.S., Geissler P.E. Can redistribution of material by sputtering explain the hemispheric dichotomy of Europa? // Icarus. — 2003. — **161**, № 1. — P. 90–101.
60. Tufts B. R., Greenberg R., Geissler P., et al. Crustal displacement features on Europa // Geol. Soc. Am. — 1997. — Abstr. Programs. 29. A-312.
61. Verbiscer A., Veverka J. Scattering properties of natural snow and frost: Comparison with icy satellite photometry // Icarus. — 1990. — **88**, № 2. — P. 418–428.
62. Williams K.K., Greeley R. Estimates of ice thickness in the Conamara Chaos region of Europa // Geophys. Res. Lett. — 1998. — **25**. — P. 4273–4276.
63. Yoder C.F., Sjogren W.L. Tides on Europa, in Europa Ocean // Capistrano Conf. 5 San Juan Capistrano Res. Inst. — 1996. San Juan Capistrano, Calif. — P. 89–90.
64. Zahnle K., Dones L., Levison H.F. Cratering rates on the Galilean satellites // Icarus. — 1998. — **136**, № 1. — P. 202–222.

Поступила в редакцию 1.08.2011