

УДК 523.4

Асимметрия отражательных свойств полушарий спутника Юпитера Европы

А.П. Видьмаченко, А.В. Мороженко, А.И. Клянчин, В.И. Шавловский,
Ю.С. Иванов, Н.М. Костокрыз

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины

Вращение Европы вокруг центральной планеты синхронное. Ведущее полушарие значительно ярче и менее загрязнено «не ледяным» материалом, чем заднее полушарие. Высокое альbedo спутника может свидетельствовать о том, что лед на его поверхности достаточно чистый и образованный сравнительно недавно: 1,5–30 млн. лет. Сравнение снимков поверхности КА «Вояджер» и «Галилео» с невысокой пространственной разрешающей способностью практически не обнаружило заметных изменений за 20 лет между пролетами двух КА. Но детальный анализ наблюдательных данных с высоким разрешением указывает на ряд особенностей на поверхности, которые могут свидетельствовать об изменениях ее геологических структур за это время. Используя наши спектральные наблюдения галилеевых спутников Юпитера в 2009 и 2010 гг. и наблюдения других авторов при разных значениях орбитальных и солнечных фазовых углов в интервале длин волн 346–750 нм были определены спектральные значения геометрического альbedo для их ведущих и ведомых сторон. Подтвердился высокий геометрический альbedo в красном участке спектра для Ио и Европы; для длин волн <500 нм для Ио оно резко уменьшается с уменьшением длины волны; для Ганимеда и Каллисто уменьшение плавное, а для Европы градиент уменьшения занимает промежуточное положение. Такой характер изменения спектрального хода альbedo поверхности Европы в некоторой степени можно объяснить выпадением серы с Ио. Причем поглощение серой сильнее на ведомом полушарии. Это указывает на то, что сера на переднем полушарии значительно быстрее «перерабатывается» метеоритной бомбардировкой, уходя в подповерхностный шар реголита.

АСИМЕТРИЯ ВІДБИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІВКУЛЬ СУПУТНИКА ЮПІТЕРА ЄВРОПИ, Видьмаченко А.П., Мороженко О.В., Клянчин А.І., Шавловський В.І., Иванов Ю.С., Костокрыз Н.М. — Обертання Європи навколо центральної планети синхронне. Передня півкуля значно яскравіша і менш забруднена «не крижаним» матеріалом, ніж задня. Високе альbedo супутника може свідчити про те, що лід на його поверхні достатньо чистий і утворений порівняно недавно: 1,5–30 млн. років тому. Порівняння знімків поверхні КА «Вояджер» і «Галілео» з невысокою просторовою роздільною здатністю практично не виявило помітних змін за 20 років між прольотами два КА. Але детальний аналіз спостережених даних з високою просторовою роздільною здатністю вказує на ряд особливостей на поверхні, які можуть свідчити про зміни її геологічних структур за цей час. Використовуючи наші спектральні спостереження галілеєвих супутників Юпітера в 2009 і 2010 рр. і спостереження інших авторів при різних значеннях орбітальних і сонячних фазових кутів в інтервалі довжин хвиль 346–750 нм було визначено спектральні значення геометричного альbedo для їх ведучих і ведомих сторін. Підтвердился високий геометричний альbedo в червоній ділянці спектру для Іо і Європи; для довжин хвиль <500 нм для Іо воно різко зменшується зі зменшенням довжини хвилі; для Ганімеда і Каллісто зменшення плавне, а для Європи градієнт зменшення займає проміжне положення. Такий характер зміни спектрального ходу альbedo поверхні Європи в деякій мірі можна пояснити випаданням сірки з Іо. Причому поглинання сіркою сильніше на веденій півкулі. Це вказує на те, що сірка на передній півкулі значно швидше «переробляється» метеоритним бомбардуванням, переходячи в підповерхневий шар реголіта.

ASYMMETRY OF REFLECTIVE PROPERTIES OF THE HEMISPHERES OF JUPITER SATELLITE EUROPA, by Vid'machenko A.P., Morozhenko A.V., Klyanchin A.I., Shaolouskiy V.I., Ivanov Yu.S., Kostogryz N.M. — Rotation around the central planet of Europa is synchronous. Leading hemisphere is much brighter and less polluted by “no ice” material than the trailing one. The high albedo of the satellite may indicate that the ice on the surface is clean enough and is formed recently: 1.5–30 million years ago. Comparison of surface images of spacecrafts “Voyager” and “Galileo” with a low spatial resolution did not detect any significant changes during 20 years. But a detailed analysis of observational data with high resolution points to a number of features on the surface, which may indicate a change in the geological structures during this time. Spectral geometric albedo in the wavelength range 346–750 nm of leading and trailing hemispheres of Galilean satellites were defined using of our spectral observations in 2009 and 2010 and the observations of the other authors at different values of orbital and solar phase angles. The high geometric albedo in the red region of Io and Europa spectrum are confirmed; albedo of Io decreases sharply with decreasing of wavelength for $\lambda < 500$ nm; albedo of Ganymede and Callisto — reduced smoothly; albedo of Europa have an intermediate gradient of reduction. Such behavior of the spectral variation of Europa surface albedo can be explained by deposition of sulfur from Io. Moreover, the sulfur absorption is more strongly on the trailing hemisphere. This indicates that the sulfur on the leading hemisphere is “processed” by meteoritic bombardment much faster and is gone to the sub-surface regolith layer.

Ключевые слова: отражательные свойства поверхности спутников; асимметрия свойств полушарий Европы.

Key words: reflective properties of satellite surface; asymmetry of properties of Europa's hemispheres.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение морфологических деталей поверхности спутника Юпитера Европы с помощью изображений с высоким пространственным разрешением [2], полученных с космическими аппаратами, показали ее довольно сложную морфологическую структуру. Наличие сравнительно небольшого количества ударных кратеров и ряд других особенностей поверхности указывает на ее относительную молодость. В данной работе мы рассмотрим особенности отражательных свойств поверхности Европы, полученных при дистанционных наблюдениях и возможные причины глобального различия ведущего (переднего) и ведомого (заднего) по орбите вокруг Юпитера полушарий спутника.

2. ВОЗМОЖНЫЕ АКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ЕВРОПЫ

Известно, что обращение Европы вокруг центральной планеты синхронное и поэтому одно полушарие спутника всегда «смотрит» на Юпитер (его центральный меридиан принято считать нулевым — с долготой $L = 0^\circ$), другое — никогда его не видит ($L = 180^\circ$); центр переднего полушария по орбите имеет долготу $L = 90^\circ$, заднего — $L = 270^\circ$. Ведущее полушарие является значительно ярче и менее загрязнено так называемым «не ледяным» материалом, чем заднее полушарие [2]. На рис. 1 представлены изображения заднего и переднего полушарий Европы, показывающие явные различия их яркостей.

Из некоторых предположений, высокое альbedo спутника может свидетельствовать о том, что лед на его поверхности достаточно чист и, следовательно, «молодой», образованный сравнительно недавно. Количество больших ударных кратеров — незначительно, что тоже свидетельствует о сравнительной молодости поверхности спутника. Из подсчета количества кратеров с размерами больше 10 км известный астрофизик Шумейкер оценил [65], что поверхность Европы имеет средний возраст около 1,5 млн. лет; подсчеты более мелких кратеров — указывают на возраст около 30 млн. лет; а следовательно Европа — должна быть еще достаточно геологически активной. В то же время сравнение снимков поверхности сделанных «Вояджером» и «Галилео» с невысокой пространственной разрешающей способностью практически не обнаружило заметных изменений за 20 лет, которые прошли между пролетами этих двух КА [2]. Хотя детальный сравнительный анализ наблюдательных данных с КА «Вояджер» [42, 44] и крупномасштабных снимков с «Галилео» все же указывает на ряд особенностей на поверхности спутника [59], которые могут свидетельствовать об изменениях ее геологических структур за это время.

Поверхность Европы — преимущественно очень «гладкая» поскольку перепады высот там редко превышают 50 м. Это можно понимать или как очень молодой рельеф, или как существование какого-то

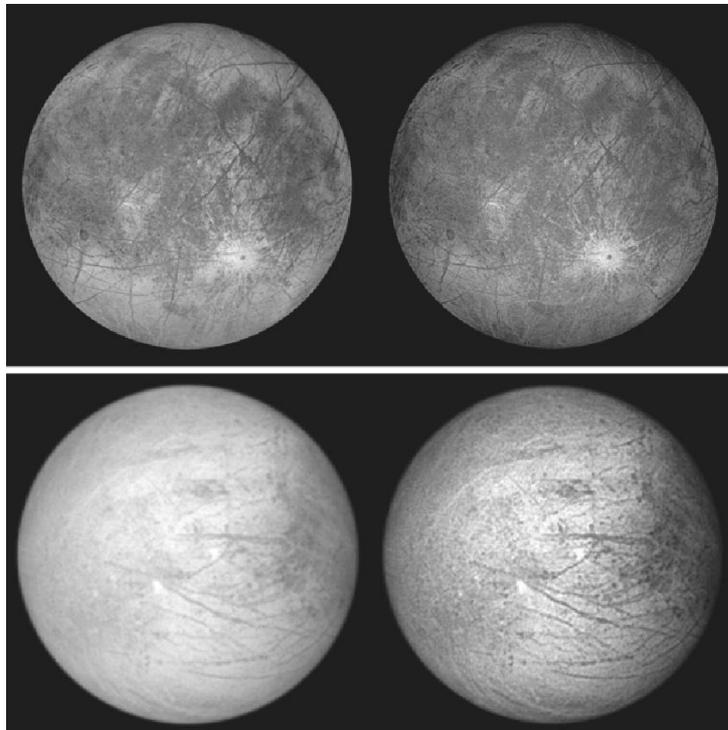


Рис. 1. Полученные с КА Галилео изображения заднего и переднего полушарий Европы (сверху и внизу, соответственно) показывают отличия в их яркости и ассоциацию темного (коричневатого) материала с геологическими особенностями. Изображения слева — дают естественную яркость; справа — контрасты несколько увеличены для того, чтобы ясно показать структурные детали. Разрешения составляют 6,9 км/пиксел для заднего полушария и 12,7 км/пиксел — для лидирующей стороны [7].

постоянного механизма сглаживания рельефа. В пользу второго — говорит довольно высокая температура на некоторой глубине, дающая возможность существования там жидкого океана из воды; к тому же лед при таких условиях способен к пластичным перемещениям. Например, в результате столкновений астероидов и метеороидов происходило постоянное смешивание материала на поверхности, приводя к образованию ледяного реголита. Кроме того, поверхность Европы бомбардируют высоко-энергичные частицы и радиолитически изменяют материал поверхности. Такое ударное изменение поверхности происходит в основном на лидирующей стороне (при орбитальном движении), приводя к ее осветлению. Плазменная бомбардировка поверхности электронами высоких энергий происходит сильнее всего на заднем полушарии и приводит к потемнению поверхности. Эти процессы в совокупности могут приводить к наблюдаемому отличию альbedo двух полушарий, производя светлый и темный («красно-коричневые») цвета [39] на рис. 1.

Чтобы получить более однозначный ответ, рядом авторов была сделана попытка определить, насколько загрязнена заснеженная поверхность Европы выбрасываемой из рядом расположенного спутника Ио серой, которая попадая в виде ионов в мощную магнитосферу Юпитера постоянно бомбардирует поверхность Европы. Плотность этого потока на сегодня хорошо известна, потому подсчет содержания серы может дать независимую оценку возраста поверхности. Выполненные космическими аппаратами измерения дали следующие результаты: серы оказалось намного меньше, чем ожидалось, а средняя скорость выпадения осадков на всю поверхность Европы за счет извержения воды — составляет 10–20 см за 1 млн. лет. Отсюда сразу же следует вывод, что через трещины (не считая прямого испарения льда) из всей поверхности спутника в целом должно выбрасываться около 100 кг воды за секунду.

Есть и множество других опосредованных данных, которые также говорят о высокой геологической активности Европы и динамических изменениях на ее поверхности. Но прямых свидетельств этому пока еще практически нет. Так, изображения с КА «Вояджер» показали очень мало возможных свидетельств вулканических извержений, которые покрывают некоторые части поверхности Европы. Тогда как изображения с высокой пространственной разрешающей способностью с КА «Галилео» показали присутствие многочисленных особенностей возможного «криовулканизма» — выходы некоторого количества жидкой воды из нижних горизонтов (рис. 2). Жидкая вода на поверхности, поддаваясь вакуумному окружению, очень быстро превращается в пар [3, 10]. Поскольку испарение забирает значительное количество тепла из воды, то это вызывает ее быстрое охлаждение и замерзание. Такое быстрое образование ледяного покрова (~0,5 м толщиной всего за несколько минут) «закрывает» отверстие выхода пара и прекратит извержение жидкости [3, 10, 74]. Получаемые при этом ледяно-жидкостные смеси и их последующее быстрое замерзание приводит к образованию часто достаточно эфемерных морфологических особенностей на поверхности спутника, которые существенно отличаются от грандиозных излияний жидкости на поверхность и уже потом к ее замерзанию.

Участки темного и относительно гладкого понижения, возможно, представляют выливание жидкости с низким значением вязкости на поверхность Европы. рис. 2а и 2b показывают два таких примера: гладкая деталь приблизительно 3 км диаметром имеет толщину < 50 м и объем < 0,5 км³ [32] и часть большего темного пятна с размером ~ 23 км. Эти морфологические детали показывают присутствие заметной вязкости в жидкости, которая предотвращает быстрые излияния жидкой воды, или теплового льда через отверстия в поверхности [21]. Наиболее подходящими для этого материалами являются жидкие глины, смеси с вхождением аммиака [40], или вылитую в трещины ледяной коры другую жидкость [21]. Результаты такого взрывного криовулканизма и является возможным веществом для темного,

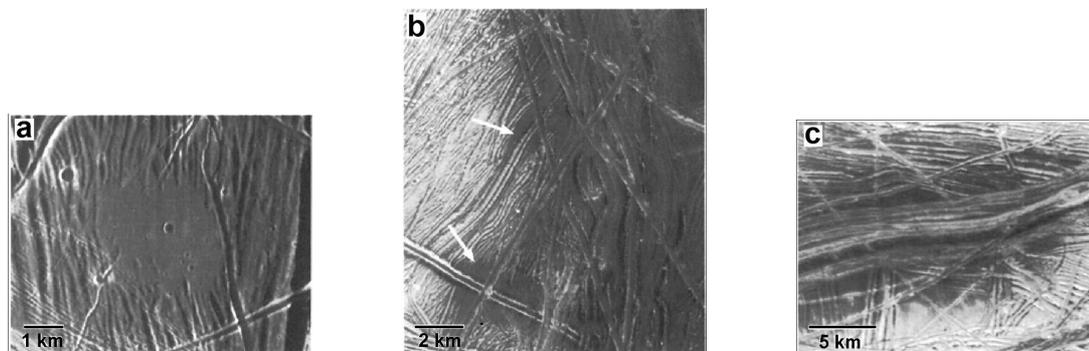


Рис. 2. Примеры кандидатов в криовулканы на Европе. а) Круглое гладкое пятно вероятно определяет местоположение результата криовулканического извержения вещества с малой вязкостью (возможно, жидкая вода). б) Внешний край темного пятна диаметром ~ 23 км. Стрелками показаны места, где темный материал как будто «расплавил» старые равнины с хребтовыми трещинами. в) Пример тройной группы на изображении с высоким разрешением. Темный материал будто вылился и заполнил окружающие понижения [27].

красновато-коричневого цвета пятен, связанных с хребтами, «веснушками» [2] и некоторыми трещинами (рис. 2с) [26, 32]. Все такие особенности для своего объяснения требуют наличия под поверхностью источника тепла [20]. Понятно, что большая плотность воды сравнительно со льдом предотвращает всплывание жидкой воды сквозь ледяную кору из чистой воды. Поэтому поскольку извержения все же имеют место, то это значит, что оно происходит из-за наличия определенного избытка давления в недрах Европы в глобальном океане, или же в небольших ячейках с жидкостью. Такое избыточное давление может образовываться в результате следующих механизмов.

1. В жидкой воде возможно присутствие ряда других составляющих (CO_2 , CO , CH_4 [17]), наличие которых при повышении температуры приводит к явлению взрывного криовулканизма. Этот механизм может приводить к заполнению трещин водой, распространяясь вверх от океана через ледяную кору.

2. Управляемый плавучестью подъем возможен в случае если загрязнители во льду и воде значительно изменяют плотность одной фазы вещества сравнительно с другой [73]. Например, плотность коры могла бы повыситься от добавки до льда не ледяного материала (например, 4–9% по объему силикатными частицами) на 10–100 кг/м³ [43].

3. Герметизация изолированных резервуаров жидкости в пределах ледяной коры могла появиться в результате нагрева из-за приливных механизмов, или же при кристаллизации льда. Эти криомагмовые ячейки, возможно, представляют остатки воды глобального океана [74].

4. Образование разломов и их последующего циклического открывания и закрывания из-за суточного изменения приливного механизма при перекачивании водно-ледяных смесей к поверхности спутника [29].

Существующие модели криовулканизма на Европе серьезно ограничивает незначительное количество возможных там химических соединений. Практическое отсутствие хорошо заметных изменений за время между полётами «Вояджера» и «Галилео» привели к определенным выводам о степени эрозии на поверхности Европы. Исходя из того, что «излияния» на поверхности должны отличаться осветлённым или затемнённым загрязнённым снегом, были рассмотрены механизмы того, как быстро вновь замёрзшие отложения «исчезнут» с поверхности. При этом предлагалось, что микрометеоритная бомбардировка перемешивает поверхностный материал, а микроскопическая эрозия («разбрызгивание», когда ионы низкой энергии из ионосферы Юпитера ударяются в поверхность Европы) выбивает из неё атомы (своеобразная ионная пылевая буря).

При исследованиях поверхности особое внимание было обращено на лучи вокруг молодых ударных кратеров, так как возможно, что эти лучи состоят из намерзаний вылившихся отложений. Если они достаточно тонкие (порядка миллиметров), то они должны довольно быстро исчезать. Так как лучи видны возле трёх больших кратеров (Пвилл, Мананнан и Телисин), которым, возможно, около 20 млн. лет, то можно сделать вывод о том, что ближайшая активность на Европе как раз и имела место около 20 млн. лет назад. Но следует ли тогда говорить, что излияния на Европе сейчас полностью исключены? Против этого можно указать на следующие возможные причины: кратерные лучи в действительности могут быть гораздо толще, а излияния могут быть достаточно древними; отложения могут быть достаточно маленькими и быстро исчезнуть, или же они находятся в ещё не исследованных детально местах поверхности. Учитывая подобные процессы, можно прийти к выводу, что мощные излияния на Европе последний раз происходили всего несколько сотен лет назад. Но закончилась ли полностью геологическая активность на Европе? Судя по всему, можно считать, что если сейчас и имеется какая-либо активность, то она или сравнительно «маломасштабная» (меньше разрешения камер КА), или же достаточно быстрая, чтобы следы её уже исчезли.

Происходит ли коричневатый материал экзогенно, или из океана — пока не известно. Но факт, что не ледяной материал объединен с геологическими особенностями, наталкивает на мысль о такой связи (рис. 1).

3. ПОИСКИ «СВЕЖЕЙ» АКТИВНОСТИ СПУТНИКА

Анализ многочисленных наблюдательных данных показывает, что отражательная способность Европы имеет фотометрическую функцию, которая зависит от длины волны, условий освещения и фазовых углов [12, 19, 52, 61]. Эти сложные фотометрические свойства затрудняют выявление истинных вариаций, но, возможно, и обеспечивают дополнительное средство для поиска недавней активной деятельности: плюмажи, необычное фотометрическое рассеивание, свечение и т.п. Например, плюмажи лучше всего могут быть заметными при их подсветке сзади, то есть при больших значениях фазовых углов. Но с КА «Галилео» изображений при фазовых углах близких к 180° было получено очень немного и притом только с низкой пространственной разрешающей способностью (73 км/пиксель). Поэтому плюмажи небольших размеров при этом могли просто быть пропущены. Хотя все же в некоторых из упомянутых работ отмечается, что слабые туманные выбросы были зарегистрированы при нескольких близких пролетах КА «Галилео» возле Европы при больших фазовых углах. Наилучшее свидетельство присутствия аномального выброса «свежих» замороженных частиц из поверхности Европы представлено

на изображении, где показан «плюмаж» на краю видимого диска [15] (рис. 3). Здесь же видно также довольно яркое пятно на поверхности, фотометрический контраст которого вырос больше, чем в 7 раз в сравнении с окружающей поверхностью при изменении фазового угла от 13° до 143° .

По предложению авторов работы [33] такое увеличение интерпретировано выбросом на поверхность некоторых материалов, выброшенных кривовулканизмом [70]. Правда в работе [52] указывалось, что этот яркий регион может и не является аномальным по сравнению с другими яркими областями поверхности на Европе, которые также были исследованы и с помощью КА «Вояджер» при значительных фазовых углах. Поэтому эту гипотезу следует проверить по изображениях равнинных участков Европы, полученных с КА «Галилео» с высокой пространственной разрешающей способностью [12, 25, 34].

Часовые масштабы заметных изменений на поверхности Европы могут быть оценены как около 10^4 лет [71]. Область Агенор является яркой группой на поверхности Европы и имеет необычные фотометрические свойства, которые указывают на существенно меньшее обратное рассеяние, чем другие местности. Это свидетельствует о том, что здесь, скорее всего, активные процессы происходили совсем недавно [24], или даже является признаком текущей активной деятельности [63].

Осуществлялся также поиск присутствия выбросов газовых султанов по изображениям, полученным в то время, когда спутник находился в тени Юпитера. В пределах 30° от той точки Европы, которая направлена на Юпитер было зарегистрировано диффузное свечение. Для его объяснения можно использовать и понятие о геологической активности, хотя и другие объяснения также возможны. Например, этот регион являлся подсолнечным к моменту затемнения, и нагревание солнечным светом обеспечивает возможность повышения концентрации некоторых газов в атмосфере Европы. Кроме того, области на поверхности спутника с долготами 0° и 180° — это те места, куда заряженные частицы, возможно, возвращались бы к ионосфере Европы по магнитным силовым линиям из магнитосферы Юпитера. Потенциально наиболее правдоподобным является преломление светового потока в атмосфере Юпитера (своеобразная фокусировка), которое обеспечивает достаточное освещение даже для того, чтобы сделать Европу видимой при полном затемнении планеты.

4. ЛЕДОВЫЙ И НЕ ЛЕДОВЫЙ МАТЕРИАЛ НА ПОВЕРХНОСТИ ЕВРОПЫ

На многих изображениях поверхности Европы хорошо заметен сравнительно чистый водный лед; тогда как темный (красноватый и коричневый) материал указывают на то, что там присутствует и не ледовый материал. Состав темного материала все еще остается достаточно спорным. Он может состоять, например, из минералов, образованных испарением соленой морской воды, или же быть обогащенным разными реагентами с серной кислотой. Например, спектральные исследования показывают, что яркое кольцо вокруг некоторых кратеров состоит из ледового подповерхностного материала, выброшенного из кратера при столкновении с метеороидом; тогда как темная область внутри кратера может содержать еще и остатки тела-ударника. Таким образом их детальные исследования могут осветить и природу столкнувшегося с Европой тела, и химический состав подповерхностных слоев Европы. Однако уверенно можно сказать, что темная не ледяная составляющая внешней поверхности спутника — одна из наиболее активных составляющих поверхностей в Солнечной системе [28].

Считается, что темный материал наиболее сконцентрирован в регионах с недавним внешним разрушением [25, 51]. Особенно это касается регионов, названных «хаосами» [6]. Сочетание темного материала

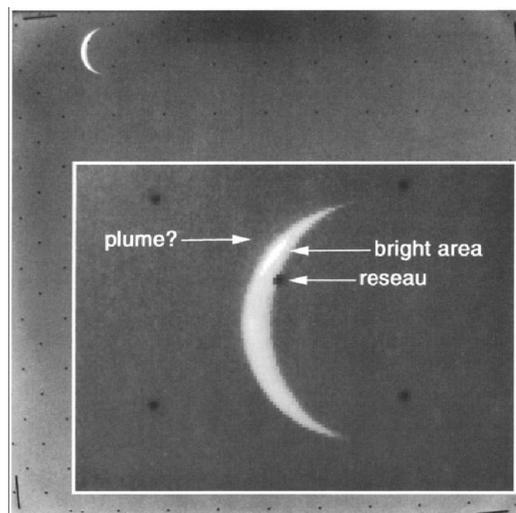


Рис. 3. Необработанное изображение поверхности Европы, полученное с КА «Вояджер-2» с пространственной разрешающей способностью 44 км/пиксель при фазовом угле 143° . Стрелками показана яркая деталь на видимой поверхности и возможный плюмаж над ней [59].

с внешним разрушением свидетельствует о том, что темный материал выходит из нижних горизонтов почвы, а возможно и от основного океана. То есть, экзогенные процессы также могут быть важными для выяснения особенностей распространения темного материала по поверхности спутника.

Темный материал сосредоточен в приэкваториальной области с центром около долготы $L = 270^\circ$, где магнитосферная бомбардировка максимальна, а влияние микрометеоритной бомбардировки минимизировано; хотя она и значительно более распространена в тропических широтах [52]. Возможно что именно заряженные частицы видоизменяют темный материал, или выбивают его из под поверхности (эндогенно) [35, 52]. Он также может быть сконцентрирован в областях всплывания в результате тепловой сублимации благодаря внутреннему теплу.

Хотя также возможно, что темный материал имеет и внешнее (экзогенное) происхождение [6, 8]. Считается, что три источника могут обеспечивать коричневым материалом поверхность Европы:

1) поставка материала из-за пределов системы Юпитера через столкновения с кометами, астероидами, метеоритами и микрометеоритами [4, 16]. Приток такого материала к поверхности будет неоднородным из-за того, что орбитальное движение спутника увеличивает его количество на лидирующем полушарии и уменьшает на заднем [76].

2) Следующим источником материала к поверхности Европы может быть извержение из внешних нерегулярных спутников Юпитера [63]; это материал имеет очень низкое альbedo. Возможно, что этот источник даже более мощный, чем от микрометеоритной бомбардировки.

3) Поставка материала от плазменного тора внутреннего спутника Ио [77] и из-за ударных выбросов большей частью осуществляется к переднему полушарию Европы; тогда как приток высоко энергичных ионов осуществляется однородно по поверхности. По оценкам, приведенным в работе [37] приток серы к заднему полушарию в точке антиапекса составляет около 10% от максимального притока.

До выполненных в 2001 г. наблюдений [69] возможные не ледяные компоненты на поверхности Европы не различались при спектральной и пространственной разрешающих способностях, которые достигались при полученных раньше наблюдениях. Это можно объяснить тем, что невозможно было отделить спектры ледяных и не ледяных компонентов на Европе из-за того, что ни один из них не занимает все полушарие. Чтобы получить диагностический спектр не ледяного материала, необходимы были как лучшее пространственное разрешение деталей на диске, так и существенно выше спектральная разрешающая способность. Такие наблюдения были выполнены с помощью адаптивной оптики Кек телескопа [69] в декабре 2001 г. с инфракрасным спектрографом высокой разрешающей способности [53] в спектральном диапазоне 0,95–5,4 мкм. При расстоянии Европы от Земли 4,2 а.е. 500 км на поверхности спутника в оппозицию отвечало 0,16 угл. с; пространственный масштаб составил 14 миллисекунд в пикселе; типичное время экспозиций при спектральных наблюдениях было 100–200 с; в диапазоне 1,45–1,75 мкм, где достоверно расположены наиболее интересные поглощающие особенности для диагностики не ледяной составляющей поверхности Европы, использовалась спектральная разрешающая способность 2000.

Богатый льдом регион наблюдался в северном полушарии спутника с координатами $200 - 230^\circ$ з.д. и $30 - 60^\circ$ с.ш., а богатая не ледовой темной составляющей местность — в экваториальной области с координатами $245 - 260^\circ$ з.д. и широтами между -150° и $+150^\circ$. Угловой размер этих регионов составлял около 0,2 угл.с. Однако обычно в наблюдательную аппаратуру попадал свет от поверхности Европы не только с «ледовой» или «не ледовой» компонентами. Ведь каждый из выбранных регионов окружает местность из другого типа компонентами. Поэтому в обоих случаях имело место так называемое «загрязнение» не ледяного спектра светом от ледяных регионов и наоборот. В работе [68] была использована специальная методика «очистки» наблюдательных спектров за вышеуказанный эффект, исходя из предположения, что поверхность Европы покрыта только смесью этих двух внешних компонентов — ледового и не ледового, — и которые присутствуют в разном количестве в спектрах этих двух регионов. Прямое сравнение результатов наблюдений с Кек телескопом и с КА «Галилео» показало существенные отличия спектров, которые были приписаны худшей пространственной разрешающей способности. Например, для «нельда» спектр содержит сильную поглощающую особенность в $11,65$ мкм (рис. 4), которую можно приписать существующей там богатой льдом области поверхности, для которой эта полоса поглощения хорошо заметна. Изображения с Кек телескопом с разрешением ~ 70 км накладывалось потом на изображение Европы, полученное с КА «Галилео». Орбитальный аппарат «Галилео» был оснащен спектрометром, который давал возможность получать спектры в диапазоне 0,7–5,2 мкм со спектральной разрешающей способностью $\sim 0,0243$ мкм и пространственной разрешающей способностью, которая изменялась в пределах от 100 вплоть до 5 км в зависимости от орбиты [9]. Проведенные наблюдения обнаружили, что темный материал на поверхности спутника имеет очень индивидуальный спектр.

Поглощающие спектральные особенности водяным льдом H_2O в длинах волн около 1,5 и 2,0 мкм регистрируются по всей поверхности Европы и становятся чрезвычайно асимметричными в темных регионах. Это может свидетельствовать о том, что вода там находится не в форме чистого льда [45, 46]. Для объяснения такой асимметричности водных групп спектральных полос поглощения были предложены

два основных объяснения. Так в работах [45, 46] предложены гидратированные соли на основе натрия и магния ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$) как достоверные кандидаты для получаемых спектров. Правда большинство разновидностей таких солей в кристаллической форме в лабораторных условиях при низких температурах показывают еще и хорошо развитую спектральную поглощающую структуру в области 1,5–1,8 мкм, которых не было видно в спектрах, полученных с КА «Галилео»; хотя спектральной разрешающей способности используемой аппаратуры было достаточно для того, чтобы обнаружить и различить эти спектральные структуры [18, 49].

Было также обнаружено, что амплитуда тонкой структуры спектральных линий уменьшается при замораживании соляных растворов к температурам, характерным для поверхности Европы [50]. Появление асимметричности спектральных полос поглощения, связанных с водными составляющими, можно также объяснить присутствием гидратированной серной кислоты (например, $H_2SO_4 \cdot 8H_2O$), которая могла сформироваться при привлечении эндогенной или экзогенной серы, или же SO_2 ; присутствие обеих этих составляющих полностью вероятно на поверхности Европы [8]. В данном случае сера могла бы быть окрашивающим агентом, который приводит к появлению красноватого цвета не ледяных компонентов в видимых длинах волн [66].

Возможно, что истина находится где-то между этими крайними случаями, ведь смеси разных концентраций замерзших в воде гидратированных солей $MgSO_4$ и Na_2SO_4 и серной кислоты H_2SO_4 в лабораторных условиях дают хорошее совпадение спектральных особенностей по форме и позиции спектральных полос поглощения групп H_2O в диапазоне спектра 1,5–2,0 мкм, полученных при наблюдениях спектров поверхности Европы от не ледяного материала с помощью адаптивной оптики Кек телескопов [58].

Было также проведено сравнение обоих исправленных спектров одного и того же не ледового региона, полученных Кек телескопом и аппаратурой КА «Галилео», с лабораторными спектрами кристаллических солей типа $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ и $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ с подобной, или низкой гидратацией [6]. Оказалось, что ни один из этих материалов не обеспечивает совершенное совпадение наблюдений и лабораторных данных, поскольку лабораторные спектры не были откалиброваны по геометрическому альбедо, в отличие от спектров Европы. Однако некоторые спектры упомянутых выше кристаллических солей показывают тонкие спектральные структурные особенности, которые не видны в «не ледяном» компоненте поверхности Европы и потому они могут не рассматриваться в качестве возможных кандидатов в такой «чистой» форме [49]. Спектральные данные показывают присутствие полос поглощения воды в 1,45 и 2,0 мкм, которые являются немного несимметричными и слегка смещенными к коротким длинам волн. В работах [45, 46] эти спектры интерпретированы как те, которые объясняются присутствием гидратированных солей $MgSO_4 \cdot X \cdot H_2O$, где $X \geq 6$. Присутствие асимметричных водных групп показывает хорошую корреляцию с областями поверхности с низким альбедо. Красные эндогенные особенности наблюдались в молодых особенностях (тройные ленточные хребты, лентиккулы и хаосы) [45]. А гидратированные соли $MgSO_4$ предусматриваются такими, чтобы быть существенным компонентом океана Европы [22, 40].

5. СПЕКТРАЛЬНЫЕ РАЗЛИЧИЯ ПОЛУШАРИЙ В ВИЗУАЛЬНОМ УЧАСТКЕ СПЕКТРА

На рис. 5 приведены относительные (по отношению к геометрическому альбедо в 563 нм) отражательные способности галилеевых спутников Юпитера в интервале длин волн 390–940 нм [47].

Как видно, в красном участке спектра геометрическое альбедо для Ио и Европы отличается заметным покраснением. Для длин волн меньше 500 нм геометрическое альбедо Ио резко уменьшается

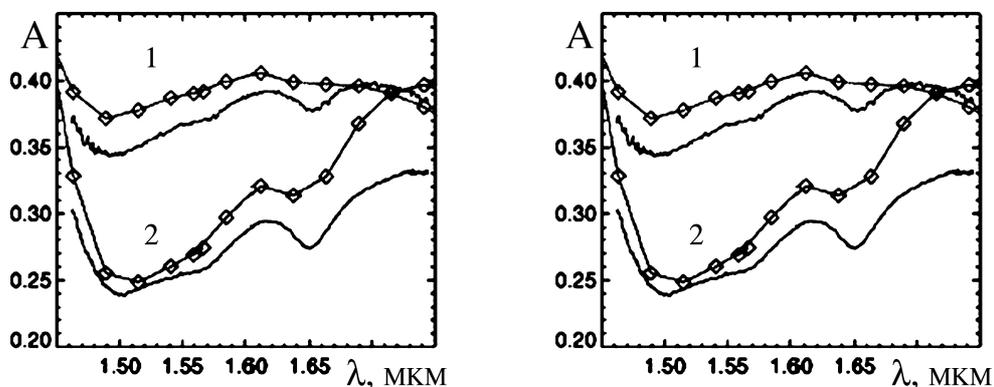


Рис. 4. Спектры богатых льдом (2) и «не льдом» (1) регионов на Европе, полученные с Кек телескопом и сз КА «Галилео» в тех же регионах. Спектры КА «Галилео» пересчитаны на геометрическое альбедо Европы [67]. Слева показаны наблюдательные спектры, справа — исправленные за возможное пространственное «загрязнение» и аппроксимацию к чистым спектрам. Гладкие непрерывные линии внизу показывают исправленные спектры, полученные с Кек телескопом [6].

с уменьшением длины волны; для Ганимеда и Каллисто — уменьшение довольно плавное, а для Европы градиент уменьшения — занимает промежуточное положение. В далеком ультрафиолете альbedo для Европы достигает значения около 0,07 [41]. Используя фильтровые наблюдения Шавловского В.И. в 1976–1984 гг. [64], спектральные наблюдательные данные, полученные нами в 2009 и 2010 гг. по наблюдениям на телескопе АЗТ-2 (Киев, Голосеево) со спектрополяриметром СПС [1] и наблюдения Европы других авторов [7] при разных значениях орбитальных и солнечных фазовых углов на рис. 6 (сверху) мы представили усредненные значения спектрального геометрического альbedo Европы в интервале длин волн 346–750 нм для ее ведущей и ведомой сторон.

Такой характер изменения спектрального хода отражательной способности поверхности Европы можно в некоторой степени объяснить такой экзогенной причиной, как постоянное выпадение серы на полушария Европы. Особенно наглядно это видно из спектральной зависимости отношения нормированных на длину волны 563 нм альbedo ведомой и ведущей полушар Европы (рис. 6, внизу). Здесь четко видны спектральные особенности, вызванные поглощением так называемой серой S_μ [7] на длинах волн менее 430 нм и полосой поглощения серы S_4 возле 540 нм. Причем, поглощение серой S_μ существенно сильнее на ведомом полушарии, тогда как поглощение серой S_4 там только ненамного выше, чем на переднем полушарии. Этот факт может независимо указывать на то, что сера на переднем полушарии значительно быстрее «перерабатывается» метеоритной бомбардировкой, уходя в подповерхностный шар реголита. В работе [7] отмечается, что выпавшая на поверхность Европы сера $\alpha-S_8$ [54, 55] при температуре 77 К под воздействием жесткого электромагнитного излучения превратится в разновидность серы S_μ [36], дающей поглощение в длинах волн менее 0,45 мкм и в серу S_4 с полосой поглощения в 0,54 мкм. Тщательный анализ результатов наших спектральных наблюдений ведущего и ведомого полушарий Европы и данных работ [5, 7, 38, 56, 57, 66, 72] показывает возможное присутствие абсорбции серой S_4 при 0,54 мкм и незначительное различие ее поглощения по полушариям. Это можно объяснить тем, что в результате столкновений метеороидов происходит постоянное смешивание материала на поверхности, приводя к образованию ледяного реголита. Кроме того, поверхность Европы бомбардируют высоко-энергичные частицы магнитосферы Юпитера и радиолитически изменяют материал поверхности, приводя к ударному осветлению ее поверхности в основном на лидирующей стороне. Плазменная бомбардировка поверхности электронами высоких энергий происходит сильнее всего на заднем полушарии и может приводить к потемнению поверхности. Эти процессы в совокупности могут приводить к наблюдаемому отличию альbedo двух полушарий, производя «белый» и «красно-коричневые» цвета.

В далеком инфракрасном участке в спектрах галилеевых спутников присутствуют многочисленные полосы поглощения, положение которых для Европы, Ганимеда и Каллисто практически идентичные, тогда как для Ио — существенно отличаются. Но спектр Европы показывает самые сильные полосы H_2O из всех спутников в длинах волн 1,53, 1,65 и 2,0 мкм. Анализ спектральных данных в УФ диапазоне [41] указывает на наличие в спектре ведомой стороны Европы полосы поглощения приблизительно

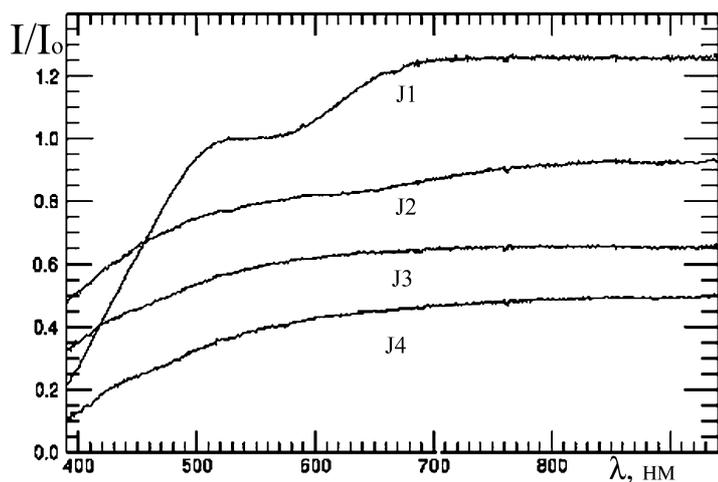


Рис. 5. Относительные спектры галилеевых спутников по наземным наблюдениям (Karkoschka, 1994). Спектр Ио (J1) нормирован на 1,0 в $\lambda = 563$ нм. Спектры Европы (J2), Ганимеда (J3) и Каллисто (J4) — каждый последующий сдвинут вниз на 0,2 относительно предыдущего [47].

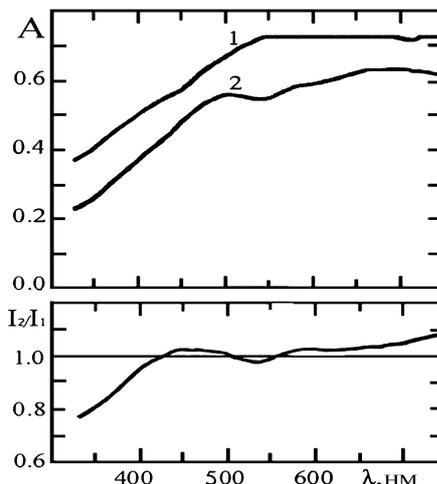


Рис. 6. Сверху — усредненные значения геометрического альbedo ведущего (1) и ведомого (2) полушарий Европы по нашим наблюдениям в 2009 и 2010 гг. и по данным работ [7, 64]. Среднеквадратичный разброс данных изменяется от 4% в $\lambda 346$ нм до 2% в $\lambda 750$ нм. Внизу — отношение относительных (нормированных на данные при $\lambda 563$ нм) спектров ведомого и ведущего полушарий Европы.

в длине волны 280 нм, которая по положению и форме напоминает полосу А–Х молекулы SO_2 . Была предложена гипотеза, что эта полоса возникает в результате рассеяния УФ излучения в кристаллической решетке водяного льда путем образования связи S–O в случае, когда в решетку попадают атомы серы. Заметнее всего она проявляется в пределах долгот $223\text{--}333^\circ$ и 90° с наибольшей глубиной при $L = 277^\circ$. Сопоставление спектров Европы с лабораторными спектрами разных веществ (см., например, [13, 14]) привело к выводу, что основной составляющей ее поверхностных слоев есть водяной лед при температуре приблизительно 150 К с возможным размером зерен около 100 мкм. При этом покрытые водяным льдом по разным оценкам занимает от 50 до 100% площади поверхности.

Анализ спектров, полученных с КА «Галилео» с высоким пространственным разрешением [48] также дает возможность утверждать, что темные в визуальном участке спектра черты поверхности Европы показывают, что усиление поглощения в некоторых спектральных особенностях следует приписать не ледяным материалам, в том числе гидратированным солям и серной кислоте. Причем, искажение спектров группы гидратов возрастает в направлении к центрам трещин, указывая на них как на источники образования не ледяных материалов. Слабая полоса поглощения возле $\lambda 1,344$ мкм преимущественно образуется именно в пределах трещин и других областей поверхности с низким значением альбедо. Эта абсорбция относится к поглощению некоторым количеством минералов гидратированных солей Mg и Na [50] и H_2SO_4 [6].

Сила и форма полосы поглощения в $\lambda 1,65$ мкм, относящейся к кристаллическому, а не к переработанному метеоритной бомбардировкой аморфному [30, 31]; кристаллический лед подразумевает наличие относительно теплых образований, возможно связанных с тепловой конвекцией в ледяном панцире и вытеснение неледяного материала из нижних горизонтов.

6. ВЫВОДЫ

Таким образом, на многочисленных снимках найдено ряд свидетельств (возможные потоки жидкости, изморозь на внешней поверхности, некоторые топографические детали), которые могут определенным образом свидетельствовать о существовании океана или теплого материала с низким значением вязкости, — теплого льда. Именно это, вероятно, играет ключевую роль при формировании особенностей рельефа на поверхности Европы. О геологической молодости стратиграфических особенностей поверхности Европы свидетельствует следующее: незначительное количество больших ударных кратеров, что также указывает на слабую литосферу; вид ударных структур указывает на присутствие коры с низким значением вязкости и на присутствие жидкой воды или теплого с малой вязкостью льда на глубине 6–15 км.

Выталкиванием жидкой воды на поверхность спутника можно объяснить присутствие на поверхности Европы некоторых очень гладких (вероятно в результате криовулканизма) участков. Однако, это может указывать как на присутствие локализованных водных резервуаров, так и глобального океана. Присутствие маленьких мобильных ледяных блоков (часто наклоненных) в регионах хаоса убеждает, что, материал для образования областей хаоса к началу его изменения мог представлять собой и жидкую воду, и жидкую глинистую субстанцию; но это не обязательно является признаком глобального океана. Некоторые линейчатые хребтовые образования также говорят о необходимости наличия жидкой воды (возможно и океана) в глубине спутника. Жидкий водный океан в Европе был бы простым и всесторонним объяснением целого ряда геологических особенностей на поверхности спутника, найденных на изображениях КА «Галилео». То есть, результаты могут быть в значительной степени объяснены, если Европа имеет: эластичную литосферу толщиной $\sim 0,1\text{--}0,5$ км и затем ломкую литосферу толщиной $\sim 1\text{--}2$ км; гибкую конвективную астеносферу толщиной от 4 до > 20 км; цельную ледяную кору толщиной от 6 до 40 км, под которой находится жидкая вода. Если блоки в регионе хаоса когда-то были плавучими, то жесткая ледяная кора, возможно, имела там локальную толщину 0,5–3 км. Толщина плавающей ледяной коры на Европе предусматривает глобальные изменения, которые могут вызываться 1) широтными и долготными вариациям инсоляции, 2) нагреванием в результате приливов и отливов, 3) локальными тепловыми аномалиями и 4) геологической деятельностью на спутнике. Поверхность Европы — преимущественно очень «гладкая» поскольку перепады высот там редко превышают 50 м. В результате столкновений астероидов и метеороидов происходило постоянное смешивание материала на поверхности, приводя к образованию ледяного реголита.

Кроме того, поверхность Европы бомбардируют высоко-энергичные частицы магнитосферы Юпитера и радиолитически изменяют материал поверхности, приводя к ударному осветлению ее поверхности в основном на лидирующей стороне (при орбитальном движении). Плазменная бомбардировка поверхности электронами высоких энергий происходит сильнее всего на заднем полушарии и может приводить к потемнению поверхности. Эти процессы в совокупности могут приводить к наблюдаемому отличию альбедо двух полушарий, производя «белый» и «красно-коричневые» цвета.

Используя наши спектральные наблюдения галилеевых спутников Юпитера в 2009 и 2010 гг. и наблюдения других авторов в интервале длин волн 346–755 нм при разных значениях орбитальных

фазовых углов были определены спектральные значения геометрического альbedo для их ведущих и ведомых сторон. Подтвердилось, что для Ио и Европы геометрические альbedo в красном участке спектра чрезвычайно высоки; для длин волн короче 500 нм для Ио оно резко уменьшается с уменьшением длины волны; для Ганимеда и Каллисто уменьшение довольно плавное, а для Европы градиент уменьшения занимает промежуточное положение. Такой характер изменения спектрального хода отражательной способности поверхности Европы можно в некоторой степени объяснить такой экзогенной причиной, как постоянное выпадение серы на полушария Европы. Особенно наглядно это видно из спектральной зависимости отношения нормированных на длину волны 560 нм альbedo ведомой и ведущей полусфер Европы. Здесь четко видны спектральные особенности, вызванные сильным поглощением так называемой серой S_{μ} на длинах волн менее 430 нм и полосой поглощения серы S_4 возле 540 нм. Причем, поглощение серой S_{μ} существенно сильнее на ведомом полушарии, тогда как поглощение серой S_4 там только ненамного выше, чем на переднем полушарии. Этот факт может независимо указывать на то, что сера на переднем полушарии значительно быстрее «перерабатывается» метеоритной бомбардировкой, уходя в подповерхностный шар реголита.

Из сказанного следует, что для Европы можно представить четыре возможные эволюционные сценарии: 1) Спутник находится в устойчивом состоянии и сейчас покрывает себя новыми пятнами; то есть изменение геологического состояния Европы является не глобальным, а пятнистым [60]. 2) Спутник именно в настоящий момент проходит очень специальное время своей истории [11]. 3) На спутнике происходит глобальная деятельность эпизодического или спорадического всплывания [23]. 4) Поверхность спутника — в действительности является очень старой. Будущие исследования должны помочь определить, какой из представленных сценариев эволюции Европы является наиболее приемлемым для этого спутника Юпитера.

1. Видьмаченко А.П., Иванов Ю.С., Мороженко А.В. и др. Спектрополяриметр наземного супроводження Космічного експеримента «Планетний моніторинг» // Космічна наука і технологія. — 2007. — **13**, № 1. — С. 63–70.
2. Видьмаченко А.П., Мороженко А.В., Клянчин А.И. Асимметрия отражательных свойств полушарий спутника Юпитера Европы // Вісник Астрономічної школи. — 2011. — **7**, № 1. — Р. 117–132.
3. Allison M.L., Clifford M.S. Ice-covered water volcanism on Ganymede // J. Geophys. Res. — 1987. — **92**. — Р. 7865–7876.
4. Anders E., Grevasse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar // Geochim. Cosmochim. Acta. — 1989. — **53**. — Р. 197–214.
5. Calvin W.M., Clark R.N., Brown R.H., et al. Spectra of the icy galilean satellites from 0.2 to 5 μm — a compilation, new observations, and a recent summary // J. Geophys. Res. — 1995. — **100**. — Р. 19041–19048.
6. Carlson R.W., Anderson M.S., Mehlman R., et al. Distribution of hydrate on Europa: Further evidence for sulfuric acid hydrate // Icarus. — 2005. — **177**, № 2. — Р. 461–471.
7. Carlson R.W., Calvin W.M., Dalton J.B., et al. Europa's Surface Composition // Europa. Edited by R.T.Pappalardo, W.B.McKinnon, K.K.Khurana. — 2009. — University of Arizona Press, Tucson. The University of Arizona space science. — 283 p.
8. Carlson R.W., Johnson R.E., Anderson M.S. Sulfuric acid on Europa and the radiolytic sulfur cycle // Science. — 1999. — **286**. — Р. 97–99.
9. Carlson R.W., Weissman P.R., Smythe W.D., et al. Near-Infrared mapping spectrometer experiment on Galileo // Space Sci. Rev. — 1992. — **60**. — Р. 457–502.
10. Cassen P., Reynolds R.T., Peale S.J. Is there liquid water on Europa? // Geophys. Res. Lett. — 1979. — **6**. — Р. 731–734.
11. Cassen P.M., Peale S.J., Reynolds R.T. Structure and thermal evolution of the Galilean satellites // In Satellites of Jupiter. — 1982. — Ed. by D. Morrison. — Univ. of Ariz. Press, Tucson. — Р. 93–128.
12. Clark B.E., Helfenstein P., Veverka J., et al. Multispectral terrain analysis from Galileo's of Europa first images // Icarus. — 1998. — **135**, № 1. — Р. 95–106.
13. Clark R.N. The spectral reflectance of water-mineral mixtures at low temperatures // Journal of Geophysical Research. — 1981. — **86**. — Р. 3074–3086.
14. Clark R.N., McCord T.B. The Galilean satellites — New near-infrared spectral reflectance measurements /0.65–2.5 microns/ and a 0.325-5 micron summary // Icarus. — 1980. — **41**, № 1. — Р. 323–339.
15. Cook A.F., Shoemaker E.M., Soderblom L.A., et al. Volcanism in ice on Europa // Bull. Am. Astron. Soc. — 1982. — **14**. — Р. 736–737.
16. Cooper J.F., Johnson R.E., Mauk B.H., et al. Energetic ion and electron irradiation of the icy Galilean satellites // Icarus. — 2001. — **149**, № 1. — Р. 133–159.
17. Crawford G.D., Stevenson D.J. Gas-driven water volcanism and the resurfacing of Europa // Icarus. — 1998. — **73**, № 1. — Р. 66–79.
18. Dalton J.B. Spectral behavior of hydrated sulfate salts: Implications for Europa mission spectrometer design // Astrobiology. — 2003. — **3**. — Р. 771–784.
19. Domingue D.L., Hapke B. Disk-resolved photometric analysis of European terrains // Icarus. — 1992. — **99**, № 1. — Р. 70–81.
20. Fagents S.A., Greeley R., Sullivan R.J., et al. A Cryomagmatic Origin for Low Albedo Features on Europa // 30th

- Annual Lunar and Planetary Science Conference. — March 15–29, 1999. Houston, TX. — Abstract no. 1296.
21. *Fagents S.A., Kadel S.D., Greeley R., et al.* Styles of cryovolcanism on Europa: Summary of evidence from the Galileo nominal mission // *Lunar Planet. Sci. Conf. XXIX.* — 1998. — Abstract no. 1721.
 22. *Fanale F.P., Li Y.-H., Decarlo E., et al.* Laboratory simulation of the chemical evolution of Europa's aqueous phase // *Lunar Planet. Sci. Conf. XXIX.* — 1998. — Abstract no. 1248.
 23. *Fischer H.-J., Spohn T.* Thermal-orbital histories of viscoelastic models of Io (J1) // *Icarus.* — 1990. — **83**, № 1. — P. 39–65.
 24. *Geissler P.E., Greenberg R., Hoppa G., et al.* A recently active lineament on Europa? // *Lunar Planet. Sci. Conf. XXIX.* — 1998. — abstract 1904.
 25. *Geissler P.E., Greenberg R., Hoppa G., et al.* Evolution of lineaments on Europa: Clues from Galileo multispectral imaging observations // *Icarus.* — 1998. — **135**, № 1. — P. 107–126.
 26. *Greeley R., Coon M., Sullivan R., Geissler P.E., et al.* Terrestrial sea ice processes: Considerations for Europa // *Icarus.* — 1998. — **135**, № 1. — P. 25–40.
 27. *Greeley R., Sullivan R., Klemaszewski J., et al.* Europa: Initial Galileo Geological Observations // *Icarus.* — 1998. — **135**, № 1. — P. 4–24.
 28. *Greeley R., Chyba Ch.F., Head J.W. III, et al.* Geology of Europa // In: *Jupiter. The planet, satellites and magnetosphere.* Edited by Fran Bagenal, Timothy E. Dowling, William B. McKinnon. Cambridge planetary science, Vol. 1, Cambridge, UK: Cambridge University Press. — 2004. — P. 329–362.
 29. *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.
 30. *Grundy W.M., Schmitt B.* The temperature-dependent near-infrared absorption spectrum of hexagonal H₂O ice // *Journal of Geophysical Research.* — 1998. — **103**, Issue E11. — P. 25809–25822.
 31. *Hansen G.B., McCord T.B.* Amorphous and crystalline ice on the Galilean satellites: A balance between thermal and radiolytic processes // *Journal of Geophysical Research.* — 2004. — **109**, Issue E1. — P.E01012.
 32. *Head J.W., Sherman N.D., Pappalardo R.T., et al.* Cryovolcanism on Europa: Evidence for the emplacement of flows and related deposits in the EA region (5N, 305W) and interpreted eruption conditions // *Lunar Planet. Sci. Conf. XXIX.* — 1998. — abstract no. 1491.
 33. *Helgenstein P., Cook A.F.* Active venting on Europa? Analysis of a transient bright surface feature // *Lunar Planet. Sci. Conf. XV.* — 1984. — P. 531–532.
 34. *Helgenstein P., Currier N., Clark B.E., et al.* Galileo observations of Europa's opposition effect // *Icarus.* — 1998. — **135**, № 1. — P. 41–63.
 35. *Hendrix A.R., Barth C.A., Hord C.W., et al.* Disk-resolved Observations of the Ultraviolet Absorber on Callisto's Leading Hemisphere // 29th Annual Lunar and Planetary Science Conference. March 16–20, 1998. Houston, TX. — Abstract no. 1865.
 36. *Hosokawa S., Matsuoka T., Tamura K.* Optical absorption spectra of liquid sulphur over a wide absorption range // *J. Phys. Condens. Matter.* — 1994. — **6**. — P. 5273–5282.
 37. *Johnson R.E., Carlson R.W., Cooper J.F., et al.* Radiation Effects on the Surfaces of the Galilean Satellites // In: *Jupiter.* — F. Bagenal, W. McKinnon, Eds. — Cambridge University Press, Cambridge. — 2004. — P. 234–272.
 38. *Johnson T.* Albedo and spectral reflectivity of the galilean satellites of Jupiter // *Bull. Am. Astron. Soc.* — 1970. — **2**. — P. 235
 39. *Johnson T.V., Pilcher C.B.* Satellite spectrophotometry and surface compositions // In: *Planetary Satellites.* — Ed. J.A. Burns. Univ. Ariz. Press, Tucson. — 1977. — P. 232–268.
 40. *Kargel J.S.* Brine volcanism and the interior structures of asteroids and icy satellites // *Icarus.* — 1991. — **94**, № 2. — P. 368–390.
 41. *Lane A.L., Nelson R.M., Matson D.L.* Evidence for sulphur implantation in Europa's UV absorption band // *Nature.* — 1981. — **292**. — P. 38–39.
 42. *Lucchitta B.K., Soderblom L.A., Ferguson H.M.* Structures on Europa // In: *Lunar and Planetary Science Conference, 12th, Houston, TX, March 16–20, 1981, Proceedings. Section 2.* New York and Oxford, Pergamon Press. — 1982. — P. 1555–1567.
 43. *Lunine J.L., Stevenson D.J.* Thermodynamics of clathrate hydrate at low and high pressures with application to the outer Solar System // *Astrophys. J. Suppl.* — 1985. — **58**. — P. 493–531.
 44. *Malin M.C., Pieri D.C.* Europa // In: *Satellites.* — Edited by J.A. Burns and M.S. Matthews, Univ. of Ariz. Press, Tucson. — 1986. — P. 689–717.
 45. *McCord T.B., Hansen G.B., Matson D.L., 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.
 46. *McCord T.B., et al.* Salts on Europa's surface detected by Galileo's Near Infrared Mapping Spectrometer // *Science.* — 1998. — **280**. — P. 1242–1245.
 47. *McCord T.B., Coradini A., Hibbitts C.A., et al.* Cassini VIMS observations of the Galilean satellites including the VIMS calibration procedure // *Icarus.* — 2004. — **172**, № 1. — P. 104–126.
 48. *McCord T.B., Hansen G.B., Combe J.-P., Hayne P.* Hydrated minerals on Europa's surface: An improved look from the Galileo NIMS investigation // *Icarus.* — 2010. — **209**, № 2. — P. 639–650.
 49. *McCord T.B., Orlando T.M., Teeter G., et al.* Thermal and radiation stability of the hydrated minerals epsomite, mirabilite, and natron under Europa environmental conditions // *J. Geophys. Res.* — 2001. — **106**. — P. 3311–3319.
 50. *McCord T.B., Teeter G., Hansen G.B., et al.* Brines exposed to Europa surface conditions // *J. Geophys. Res.* —

2002. — **107**. — P. 4–14–6.
51. *McCord T.B., Hansen G.B., Clark R.N., et al.* Non-water-ice constituents in the surface material of the icy Galilean satellites from the Galileo near-infrared mapping spectrometer investigation // *Journal of Geophysical Research*. — 1998. — **103**, Issue E4. — P. 8603–8626.
52. *McEwen A.S.* Exogenic and endogenic albedo and color patterns on Europa // *J. Geophys. Res.* — 1986. — **91**. — P. 8077–8097.
53. *McLean I.S., Becklin E.E., Bendiksen O., et al.* Design and development of NIRSPEC: a near-infrared echelle spectrograph for the Keck II telescope // *Proc. SPIE. Infrared Astronomical Instrumentation*, Albert M. Fowler; Ed. — 1998. — **3354**. — P. 566–578.
54. *Meyer B., Oommen T.V., Jensen D.* The color of liquid sulfur // *J. Phys. Chem.* — 1971. — **75**. — P. 912–917.
55. *Meyer B., Stroyer-Hansen T., Oommen T.V.* The visible spectrum of S₃ and S₄ // *J. Molec. Spectrosc.* — 1972. — **42**. — P. 335–343.
56. *Nelson R.M., Lane A.L., Matson D.L., et al.* Spectral geometric albedos of the Galilean satellites from 0.24 to 0.34 micrometers: Observations with the International Ultraviolet Explorer // *Icarus*. — 1987. — **72**. — P. 358–380.
57. *Noll K.S., Weaver H.A., Gonnella A.M.* The albedo spectrum of Europa from 2200 angstrom to 3300 angstrom // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100**. — P. 19057–19059.
58. *Orlando T.M., McCord T.B., Grieves G.A.* The chemical nature of Europa surface material and the relation to a subsurface ocean // *Icarus*. — 2005. — **177**, № 3. — P. 528–533.
59. *Pappalardo R.T., Belton M.J.S., Breneman H.H.M., et al.* Does Europa have a subsurface ocean? Evaluation of the geological evidence // *Journal of Geophysical research*. — 1999. — **104**, № E10. — P. 24015–24055..
60. *Pappalardo R.T., Sherman N.D., Head J.W., et al.* Distribution of Mottled Terrain on Europa: A Possible Link to Nonsynchronous Rotation Stresses // 29th Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 16–20. — 1998. — Houston, TX. — Abstract no. 1923.
61. *Phillips C.B., McEwen A.S., Geissler P.E., et al.* New mosaics of Europa and mapping of endogenic units // Conference Paper. 28th Annual Lunar and Planetary Science Conference. — 1997. — P. 103.
62. *Pollack J.B., Witteborn F.C., Erickson E.F., et al.* Near-infrared spectra of the Galilean satellites: Observations and compositional implications // *Icarus*. — 1978. — **36** № 2. — P. 271–303.
63. *Prockter L.M., Head J.W., Pappalardo R.T., et al.* Geological mapping of central Agenor Linea, Europa (212–226) // *Lunar Planet. Sci. Conf.*, XXX. — 1999. — abstract no. 1299.
64. *Shaolovskij V.I.* Opposition effects of Jupiter's satellites Io and Europa // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel, Suppl.* — 2005. — **5**. — P. 513–516.
65. *Shoemaker E.M.* The age of Europa's surface // In: *Europa Ocean Conference, Capistrano Conf. 5*, San Juan Capistrano Res. Inst., San Juan Capistrano, Calif. — 1996. — P. 65–66.
66. *Spencer J.R., Calvin W.M., Person M.J.* Charge-coupled-device spectra of the galilean satellites: Molecular-oxygen on Ganymede // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100**. — P. 19049–19056.
67. *Spencer J.R., Carlson R.W., Becker T.L., et al.* Appendix I: Maps and spectra of Jupiter and the Galilean satellites // In: *Jupiter. The planet, satellites and magnetosphere*. Edited by Fran Bagenal, Timothy E. Dowling, William B. McKinnon. Cambridge planetary science, Vol. 1, Cambridge, UK: Cambridge University Press. — 2004. — P. 689–698.
68. *Spencer J.R., Grundy W.M., Dumas Ch., et al.* The nature of Europa's dark non-ice surface material: Spatially-resolved high spectral resolution spectroscopy from the Keck telescope // *Icarus*. — 2006. — **182**, Issue 1. — P. 202–210.
69. *Spencer J.R., Grundy W.M., Dumas C., et al.* The nature of Europa's non-ice surface components: High spatial and spectral resolution spectroscopy from the Keck telescope // *Icarus*. — 2005. — **182**, № 1. — P. 202–210.
70. *Verbiscer A., Helfenstein P.* Reflectance spectroscopy of icy satellite surfaces // In *Solar System Ices*. — Ed. by B.Schmitt. — Kluwer Acad., Norwell, Mass. — 1998. — P. 157–197.
71. *Veeverka J., Thomas P., Johnson T.V., et al.* The physical characteristics of satellite surfaces // In *Satellites*. — Ed. by Bums J.A., Mathews M.S. — Univ. of Ariz. Press, Tucson. — 1986. — P. 342–402.
72. *Wamsteker W.* Narrowband photometry of the galilean satellites // *Comm. Lunar Planet. Lab. Univ. Arizona, Tucson*. — 1972. — **167**. — P. 171–177.
73. *Wilson L., Head J.W.* Europa cryovolcanism: Ascent and eruption of magma and its role in resurfacing // 29th Annual Lunar and Planetary Science Conference. — March 16–20, 1998. — Houston, TX. — Abstract No. 1138.
74. *Wilson L., Head J.W., Pappalardo R.T.* Eruption of lava flows on Europa: Theory and application to Thrace Macula // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**. — P. 9263–9272.
75. *Wizinowich P., Acton D.S., Shelton C., et al.* First Light Adaptive Optics Images from the Keck II Telescope: A New Era of High Angular Resolution Imagery // *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2000. — **112**, Issue 769. — P. 315–319.
76. *Zahnle K., Dones L., Levison H.F.* Cratering rates on the Galilean satellites // *Icarus*. — 1998. — **136**, № 2. — P. 202–222.
77. *Zahnle K., Alvarellos J., Dobrovolskis, et al.* Primary, secondary, and sesquinary craters on Europa. Ices, Oceans, and Fire: Satellites of the Outer Solar System (Io attacks) // Vol. LPT Contribution № 1357. Lunar and Planetary Institute, Boulder, CO. — 2007. — P. 155–156.

Поступила в редакцию 1.08.2011