

2.5. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ К МАРСУ И ВЕНЕРЕ

к.ф.-м.н. М. А. Креславский и д.ф.-м.н. Ю. Г. Шкуратов

Предварительные замечания

С началом космической эры в 60-х годах прошлого века исследование Солнечной системы перестало быть прерогативой только астрономии. Полеты космических аппаратов (КА) за пределы Земли и околоземного пространства привели к грандиозному расширению методов исследования объектов Солнечной системы и вовлекли в исследования огромное количество специалистов из смежных и не смежных с астрономией областей знаний: инженеров, геологов, геофизиков, метеорологов. Постепенно некоторые традиционные виды астрономических наблюдений полностью потеряли научную ценность. Работы по планетной астрономии стали исчезать из традиционных астрофизических журналов, в то же время результаты астрономических исследований планет стали публиковаться в журналах по геофизике; с другой стороны, журналы, специализировавшиеся на планетной астрономии («Icarus», «Астрономический вестник») стали охотно публиковать, например, работы чисто геологического содержания; стали возникать новые научные журналы. Происходит и в настоящее время подходит к завершению медленный процесс становления новых областей научных знаний – науки о планетных и малых телах, планетологии (planetary science) и науки о межпланетной среде (space science). Для некоторых астрономов Солнечная система как предмет изучения стала чем-то «недостойным»; другие, в том числе большая часть харьковских ученых, напротив, целиком окунулись в новую растущую область знаний. На протяжении последней четверти века истории Харьковской астрономической обсерватории обработка данных космических миссий к телам Солнечной системы была и остается одним из важнейших направлений деятельности.

Потребителями астрофизической информации о планетах, получаемой в результате обработки и анализа данных, являются специалисты смежных специальностей: геологи, геохимии, геофизики. Поэтому значительное количество работ по анализу данных выполнялось в сотрудничестве и публиковалось в соавторстве с коллегами этих специальностей. Особую роль для нас играли и продолжают играть научные контакты с Лабораторией сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского в Москве и с отделением геологии планет факультета наук о Земле Университета Брауна в г. Провиденс, штат Род Айленд, США. Харьковчане стали постоянными участниками и неотъемлемой частью традиционного международного Микросимпозиума по планетологии, который более двух десятилетий регулярно проводится этими двумя организациями.

Эта глава посвящена нашим работам по анализу космических данных о Венере и Марсе. Первыми работами в Харьковской обсерватории, посвященными обработке и анализу планетных космических данных, полученных КА «Марс-4» и «Марс-5», были работы Дудинова и др. (1980) и Езерского и др. (1980). В первой работе была выполнена обработка панорам Марса, полученных с помощью оптико-механических сканеров, на когерентно оптической установке нашей обсерватории. В частности, с помощью режекторного фильтра, установленного в частотной плоскости, была отфильтрована строчная (телевизионная) структура изображений марсианской поверхности. В работе (Езерский и др., 1980) была предпринята одна из первых попыток проведения фотометрического анализа поверхности Марса по данным космической съемки; в частности, была подтверждена тесная корреляция между показателем цвета и альбедо поверхности, известная по данным телескопических измерений. В основном, обработку и калибровку данных КА «Марс-5» проводил В. И. Мамницкий совместно с разработчиками бортового телефотометра.

Работы по анализу результатов радиолокационного зондирования поверхности Венеры, полученных в ходе полета американского КА «Пионер-Венера-1», были выполнены совместно с сотрудниками ИРЭ АН УССР и ГЕОХИ им. В. И. Вернадского АН СССР (Корниенко и др., 1982, Усиков и др., 1982, Шкуратов и др., 1984, Basilevsky et al., 1982). Эти работы, сделанные в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого века, были пионерскими,

впервые использовали компьютеры для обработки и анализа изображений. Они заложили методические основы опыта, которым мы пользуемся до сих пор. В этих работах, в частности, впервые реконструировано изображение рельефа поверхности Венеры по распределению высот, полученному с помощью радиолокатора КА «Пионер-Венера-1». Пример таких изображений для района гор Максвелла показан на рис. 2.5.1. Аналогичное изображение (а также стереопара изображений) приведено на рис. 2.5.2 для района огромного щитового вулкана Бета (цифры указывают места посадки КА «Венера-9» – «Венера-14»). Кроме того, были исследованы корреляции между распределением высот и степенью шероховатости поверхности в дм-диапазоне неровностей и проведен кластерный анализ корреляционных диаграмм. Для анализа использовалось также распределение наклонов поверхности на базе сотни километров. Пример такого распределения для района Земли Иштар показан на рис. 2.5.3 в виде штриховой карты.

После полета АМС «Венера-15» и «Венера-16» и получения радиолокационных изображений части поверхности Венеры стало возможным геологическое картирование этой планеты. Сравнивая геологические карты с глобальными радиофизическими данными КА «Пионер-Венера», мы выполнили прогнозирование распространенности геологических подразделений на части планеты, не покрытые радарными изображениями. Это, в частности, касалось структур, получивших название «тессера» (Bindschadler et al., 1990). Затем, после полета КА «Магеллан», этот прогноз блестяще подтвердился. С середины 90-х годов, после завершения работы КА «Магеллан», результаты этой миссии к Венере надолго стали материалом наших работ.

Важная серия ранних (середина 80-х) работ была связана с количественным анализом панорам поверхности Венеры, переданных советскими автоматическими межпланетными станциями (АМС) серии Венера (Шкуратов и др., 1987).

Мы участвовали в анализе изображений спутника Марса, Фобоса, полученных в ходе полета советской АМС «Фобос-2» (Жуков и др., 1994, Аванесов и др., 1990). Эти работы сделаны в конце 80-х в сотрудничестве со специалистами из ИКИ АН СССР. С конца 90-х мы участвуем в анализе данных, получаемых новым поколением американских КА, работавших и работающих на орбите вокруг Марса.

Колориметрический анализ панорам поверхности Венеры

Поверхность Венеры скрыта от наблюдателя сплошным плотным слоем облаков. Увидеть поверхность (в оптическом диапазоне) можно только приблизившись к ней (расчеты показывают, что если опуститься несколько ниже облачного слоя, детали поверхности все равно не будут видны из-за сильного молекулярного рассеяния в чрезвычайно плотных нижних слоях атмосферы). Поверхность Венеры была сфотографирована только в четырех местах посадок спускаемых аппаратов советских АМС «Венера-9» и «Венера-10» (1975 г.) и «Венера-13» и «Венера-14» (1982 г.). Эти панорамы поверхности получены сканирующими телевизионными камерами, причем последние две панорамы цветные, то есть получены в трех фильтрах. В синем фильтре сигнал оказался слишком слабым (в синей области спектра освещенность поверхности мала из-за поглощения в облаках и нижней атмосфере), так что фактически есть панорамы в красном и зеленом фильтрах. В местах посадки АМС «Венера-10» и «Венера-14» поверхность сложена породами, образующими блоки с горизонтальной внешней поверхностью и кое-где заметной слоистой структурой. На панорамах, переданных АМС «Венера-13» (рис. 2.5.4), кроме блоков, значительную площадь занимает сыпучий грунт. На панораме АМС «Венера-9» также присутствует похожий грунт. Нас и наших коллег интересовала информация о составе пород и грунта, которую можно получить из цветных панорам АМС «Венера-13». Разумеется, данные в двух фильтрах не могут дать точный химический или минералогический состав, но некоторые важные выводы удалось сделать (Шкуратов и др., 1987).

Количественный анализ цветных панорам затруднялся тем, что телевизионные камеры не были калиброваны. Для цветовой калибровки камер некоторые части спускаемого аппарата и специальной откидной пластины были покрашены в яркие цвета. Однако, как стало ясно после окончания миссии, под влиянием горячей химически активной атмосферы Венеры краски изменили цвет.

Заметим, что отсутствие надежной калибровки приборов – это вообще типичная проблема, присущая данным, получаемым при помощи космических аппаратов. Причем

дело не только и не столько в том, что обычно нехватка средств и времени не дает возможности хорошо откалибровать прибор перед запуском. Опыт показывает, что после запуска и многомесячного перелета, а в случае спускаемых аппаратов – еще и после торможения и посадки, параметры приборов существенно меняются. Специальные же калибровочные измерения «на месте», как правило, либо принципиально невозможны, либо их очень трудно технически реализовать.

В случае телевизионных панорам поверхности мы в некотором приближении решили проблему калибровки, опираясь на сами телевизионные изображения. Вблизи аппарата поверхность на панораме кажется темнее. Это вызвано тем, что освещенность поверхности вблизи аппарата понижена за счет экранирования неба аппаратом. Предполагая яркость неба одинаковой во всех направлениях и зная размеры и форму аппарата, мы оценили относительную освещенность поверхности как функцию расстояния от оси аппарата. Зная геометрию сканирования и предполагая поверхность горизонтальной, мы рассчитали расстояния от оси аппарата и, следовательно, освещенность для каждого элемента панорамы. Линейная регрессия отсчетов яркости на панораме на рассчитанную относительную освещенность дала нам линейную калибровку с точностью до неизвестного множителя. Строго говоря, предположение об однородности яркости неба не выполняется: в двух верхних углах панорамы видны два маленьких кусочка неба у самого горизонта с противоположных от аппарата сторон, и они имеют несколько различную яркость и цвет. С другой стороны, потемнение вокруг аппарата не обнаруживает явной азимутальной зависимости, а земной опыт показывает, что при сплошной густой облачности и высоком солнце небо весьма однородно. Предположение о линейности калибровки также не является точным, однако это лучшее, что мы могли сделать. Заметим, что наша калибровка не дает абсолютных значений яркости, но дает неплохую оценку их отношений.

Пользуясь нашей калибровкой и скомпенсировав радиальный ход яркости, вызванной экранированием неба, мы получили панораму, откалиброванную в величинах, пропорциональных альбедо поверхности в красном и зеленом фильтрах. Мы построили диаграмму (двумерную гистограмму) альбедо – цвет, которая показана на рис. 2.5.5. Изолиниями на диаграмме показаны частоты встречаемости соответствующих комбинаций логарифма альбедо (в красном фильтре) и показателя цвета, т.е. отношения альбедо в красном и зеленом фильтрах. На диаграмме отчетливо выделяются два кластера, соответствующие породам и грунту. Хорошо видно, что породы и грунт сильно различаются по альбедо (грунт темнее), но одинаковы по цвету. Отсутствие абсолютной калибровки означает, что положение диаграммы по отношению к осям является произвольным, но сама форма диаграммы правильна. Конкретная оцифровка осей на рис. 2.5.5 получена из предположения о том, что среднее альбедо в каждом из фильтров совпадает с оценками, полученными при помощи спектрофотометров АМС «Венера-9» и «Венера-10» (на «Венере-13» такого прибора не было).

Показатель цвета поверхности со сложной структурой определяется не только спектральными свойствами вещества, но и эффективным размером частиц. Для моделирования этого эффекта мы воспользовались моделью спектрального хода альбедо порошкообразных поверхностей (Shkuratov et al., 1999). Эта модель позволяет, задавшись показателями преломления и поглощения, эффективным размером частиц и плотностью упаковки, вычислить альбедо, причем плотность упаковки и показатель преломления слабо влияют на результат. Заметим, что породы, хотя и не являются порошкообразной средой, за счет оптической неоднородности лучше описываются такой моделью с некоторым эффективным размером частиц и высокой плотностью упаковки, чем моделью сплошной однородной среды. Две штриховые линии на рис. 2.5.5 показывают примеры расчетов по модели порошкообразной среды. Линия 1, близкая к типичным значениям яркости и цвета для грунта, получена для отношения показателей поглощения материала в красном и зеленом свете, равном 1,80; вдоль линии меняется размер частиц. Для линии 2, проходящей через кластер пород, отношение показателей поглощения составляет 1,25. Таким образом, мы пришли к парадоксальному на первый взгляд выводу, что одинаковый цвет пород и грунта на панораме означает существенно различный спектральный ход поглощения («показатель цвета по поглощению»). Если мы, понимая ненадежность абсолютной калибровки, сместим диаграмму по отношению к осям на рис. 2.5.5, конкретные значения отношений показателей поглощения изменятся, но качественный вывод останется неизменным: материал грунта по поглощению гораздо краснее, чем материал пород. Для

этого вывода, однако, важно, что поверхность является весьма темной, абсолютные значения альбедо невелики.

Минералогический состав материала определяет спектральный ход коэффициента поглощения, следовательно, различие «цвета по поглощению» указывает на различный минералогический состав грунта и пород. Это различие означает, что грунт не является результатом простого механического выветривания, локального измельчения материала пород. Либо грунт происходит из других районов планеты и занесен в место посадки ветрами, либо он образуется локально за счет химического выветривания, т.е. изменения химического и минералогического состава, которое сопровождается измельчением.

Исследования анизотропии поверхности Венеры по радиолокационным данным

Большой цикл наших работ был связан с анализом радиофизических (радиометрических и радиолокационных) данных, полученных при помощи американского КА «Магеллан». Единственным научным прибором этого аппарата, работавшего на полярной эллиптической орбите вокруг Венеры в 1990 – 1993 г.г., была радиотехническая система, работавшая на длине волны 12,6 см в режимах радиолокационного альтиметра, картирующего радиолокатора бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА), передатчика в бистатических радарных экспериментах и радиометра. В частности, по данным РСА были построены мозаики радарных изображений почти всей поверхности планеты с фактическим разрешением 100 – 200 м (см. примеры на рис. 2.5.6 а и 2.5.7 а), которые революционизировали исследования по геологии Венеры. Одна из наших работ по анализу данных КА «Магеллан» (Креславский и Вдовиченко, 1999), о которой рассказывается ниже, опирается на данные РСА. В отличие от подавляющего большинства работ, использующих мозаики РСА только как изображения для геолого-морфологического анализа и картирования, мы использовали их для количественного анализа.

Мозаики, построенные по данным РСА, представляют пространственное распределение сечения обратного рассеяния поверхности при некотором угле падения зондирующего сигнала θ (рис. 2.5.8), нормированного на среднюю функцию обратного рассеяния всей планеты при том же самом угле падения. Мы называем эту величину радарной яркостью. Нормировка существенна для построения изображений, поскольку обратное рассеяние для большинства ландшафтов на Венере очень круто падает с увеличением θ , а этот угол сильно менялся вдоль орбиты, т.е. с широтой. Средняя функция обратного рассеяния Венеры аппроксимируется следующим выражением [1]:

$$\sigma_M(\theta) = \frac{K_1 \cos \theta}{(\sin \theta + K_2 \cos \theta)^3}, \quad (1)$$

где $K_1 = 0,118$, $K_2 = 0,111$.

Склоны, разрешенные на радарных изображениях, имеют высокую радарную яркость, если они обращены к радару, следовательно, имеют меньший локальный угол падения, и низкую – в противоположном случае. Для горизонтальных поверхностей радарная яркость определяется мелкомасштабной, не разрешаемой структурой поверхности и электромагнитными свойствами ее материала.

Существенная часть поверхности была отснята при помощи РСА дважды или трижды, причем глобальное покрытие выполнено при локации с запада (1-й цикл съемки), а часть мозаик получена при локации с востока (2-й цикл). В результате визуального сравнения мозаик 1-го и 2-го циклов [2] было найдено три лишние рельефа области, в которых радарные яркости при локации с востока и запада очень сильно отличались (на 7 – 9 дБ, почти на порядок), т.е. обратное рассеяние в этих трех областях является сильно анизотропным. Мы решили провести систематическое количественное исследование анизотропии обратного рассеяния.

На 45° ю.ш. углы падения в 1-м и 2-м циклах были одинаковы и равны 25°. Это позволяет непосредственно интерпретировать разницу радарной яркости для горизонтальных участков как анизотропию. Если углы падения существенно различны, такая разница может также вызываться различной крутизной изотропных функций обратного рассеяния. Поэтому для систематического анализа мы ограничились зоной 40 – 50° ю.ш. Наши оценки показали, что в пределах этой зоны разница радарной яркости за счет возможных вариаций крутизны

функции обратного рассеяния не превосходит 0,5 дБ (12%). Для этой широтной зоны мы построили карты отношения радарной яркости при локации с запада и с востока; для краткости, назовем ниже это отношение просто «разницей». Разумеется, на карте разницы сильно выделяется рельеф, но мы анализировали лишь равнинные участки. Для них характерны вариации разницы, принимающей как положительные, так и отрицательные значения. За исключением одной из трех упомянутых выше областей сильной анизотропии, попавшей в эту зону, разница не превосходит ± 2 дБ (~60%). Сама по себе такая величина наблюдаемой разницы могла бы быть объяснена неучтенным дрейфом параметров радиолокационной системы; более того, наблюдаемые кое-где «ступени» разницы, совпадающие с направлением орбит КА на мозаиках, указывают, что дрейф параметров действительно имел место. Однако тот факт, что границы областей повышенной и пониженной разницы часто совпадают с границами геологических подразделений, видимых на самих радарных изображениях, однозначно указывает на то, что во многих случаях вариации разницы связаны с истинными вариациями анизотропии обратного рассеяния. Таким образом, было обнаружено, что слабая (~1 дБ) анизотропия обратного рассеяния очень широко распространена на Венере.

Мы проанализировали много возможных причин наблюдаемой анизотропии функции обратного рассеяния поверхности (Креславский и Вдовиченко, 1999) и пришли к выводу, что практически единственным разумным объяснением может служить асимметричный рельеф поверхности на масштабах от длины волны до элемента разрешения. В свою очередь, наиболее вероятной, хотя и не единственной причиной формирования асимметричного мелкомасштабного рельефа является действие ветра на сыпучий материал. Например, перемещение ветром сыпучего материала может приводить к его накоплению в ветровой тени препятствий или к образованию микродюн (как предлагалось в [2]), у которых подветренные и наветренные склоны сильно различаются по крутизне. Морфология некоторых объектов, обнаруживающих выраженную слабую анизотропию, однозначно указывает на ветер как причину их образования. Таким образом, обнаруженное широкое распространение слабой анизотропии, вероятно, свидетельствует о широком распространении сыпучего, переносимого ветром материала на поверхности, возможно, такого, как мы видим на панораме (рис. 2.5.4).

Чтобы лучше понять, какого рода асимметричные неровности могут отвечать за наблюдаемую анизотропию обратного рассеяния, была рассмотрена простая модель поверхности с асимметричным пилообразным рельефом (рис. 2.5.8); для краткости будем говорить о микродюнах. Будем считать, что склоны дюн гораздо больше длины волны. Геометрию дюн будем описывать четырьмя параметрами (рис. 2.5.8): крутизна западного склона α , крутизна восточного склона β , азимут оси дюны по отношению к орбите КА ϕ и доля поверхности, занятой дюнами, $f \leq 1$. Сечение обратного рассеяния такой поверхности мы вычисляли как сумму вкладов горизонтальных участков, западных склонов и восточных склонов. При этом мы предполагали, что функция обратного рассеяния каждого участка поверхности описывается формулой (1), где угол θ отсчитывается от нормали к этому участку.

Примеры расчетов приведены на рис. 2.5.9, где разница между модельным сечением обратного рассеяния при наблюдении с запада и с востока показана как функция крутизны западного склона дюн α для некоторых наборов прочих параметров модели. Расчеты показывают, что небольшие (1 – 2 дБ) значения разницы, характерные для широко распространенной слабой анизотропии, могут быть легко достигнуты при самых разнообразных значениях параметров модели, что допускает большое разнообразие возможных эоловых форм рельефа (а не только дюн). В то же время большие (8 – 9 дБ) значения разницы, характерные для трех областей сильной анизотропии, можно получить лишь при сильных ограничениях на параметры модели, в частности, дюны должны занимать существенную площадь ($f \approx 1$), один из склонов должен быть крут, достигая угла осыпания ($\beta \geq \sim 35^\circ$). Это говорит о том, что наиболее вероятными формами мелкомасштабного рельефа в областях сильной анизотропии являются плотные поля микродюн, сформированных при стабильных ветрах и имеющих склоны с крутизной осыпания с подветренной стороны.

Картирование крупномасштабной шероховатости Марса

Большой цикл работ по статистическим характеристикам рельефа Марса на масшта-

бах сотен метров и километров был выполнен в 1999 – 2004 г.г. в соавторстве с Дж. Хэдом, профессором Университета Брауна (Провиденс, США). Исходными данными для этой работы послужили измерения лазерного альтиметра MOLA на борту американского КА «Mars Global Surveyor». КА находился на орбите вокруг Марса, близкой к полярной. Лазерный альтиметр с высокой точностью измерял расстояния между аппаратом и поверхностью в последовательных точках вдоль орбит. Расстояния между последовательными отсчетами альтиметра вдоль орбиты составляли около 300 м на поверхности; каждый отсчет относился к области около 50 м в диаметре. Точность определения расстояния от аппарата до поверхности составляла 30 см для равнинных областей, где в 50 м области характерные перепады высот не превосходили многократно эту точность. Знание орбиты аппарата было несколько хуже, так что абсолютная точность определения высот рельефа составляла порядка нескольких метров. Около 7% отсчетов отбраковывалось в основном за счет отражения от облаков. За время систематической работы прибора (до момента отказа в схеме запуска лазера) было получено более полумиллиарда хороших отсчетов высот. Типичные зазоры между орбитами с измеренными высотами имеют ширины порядка километра, хотя есть много очень близких орбит, а также несколько существенных пробелов. В полярных областях, на широтах 70° – 86° , где большое количество орбит пересекались, увязка орбит позволила построить топографические карты с разрешением около 150 м и вертикальной точностью около 1 м [3]. Данные альтиметра MOLA – это редкий случай в практике анализа данных космических миссий, когда непосредственные результаты эксперимента, представленные научной командой прибора, не требовали никаких дополнительных калибровок. Глобальные карты рельефа с разрешением около 1 км и вертикальной точностью порядка метров, составленные по данным альтиметра, революционизировали исследования по геологии, геодезии и геодинамике Марса. Рельеф почти всей поверхности Марса сейчас известен заметно лучше, чем рельеф значительной части дна земных океанов и некоторых областей земных континентов. Карты рельефа, однако, не используют всю информацию, содержащуюся в полученных данных, так как горизонтальное разрешение и вертикальная точность данных вдоль орбит существенно выше, чем между орбитами. Мы использовали эту информацию для картирования крупномасштабной шероховатости рельефа Марса.

С общей точки зрения, алгоритм картирования шероховатости достаточно прямолинеен. Рассматриваются профили рельефа вдоль орбит. С некоторым шагом вдоль профиля, например, в окрестности каждого отсчета, вычисляется некий параметр, количественно описывающий неровность профиля на некотором характерном горизонтальном масштабе. Иными словами, к профилям применяется некоторый фильтр. Использование различных горизонтальных масштабов позволяет изучать зависимость шероховатости от масштаба. Мы разбиваем поверхность планеты на ячейки, соответствующие элементам (пикселям) карты, собираем вместе все вычисленные значения выбранного параметра неровности профиля, относящиеся к данной ячейке, и, по этому набору значений, оцениваем характерное значение неровности в ячейке. По аналогии с фильтром, алгоритм оценивания характерного значения может быть назван детектором. Изюминкой нашей работы является нетрадиционный и очень удачный выбор меры шероховатости, т.е. выбор фильтра и детектора.

Традиционными характеристиками шероховатости являются, например, структурная функция, т.е. среднеквадратический перепад высот на заданной базе или, что почти то же самое, среднеквадратический уклон на заданной базе. Такой подход к картированию шероховатости по данным MOLA применялся в работе [4]. В этом подходе фильтром является некоторый вариант линейного дифференцирующего фильтра с заданным горизонтальным масштабом, а детектором – усреднение квадратов. Недостатком такого фильтра является то, что он пропускает крупномасштабные, региональные уклоны поверхности, что противоречит интуитивному понятию шероховатости. В указанных работах этот недостаток благополучно устранен вычитанием региональных уклонов, хотя произвольный выбор базового расстояния, на котором вычисляются региональные уклоны, вносит неприятный произвол в определение шероховатости. Гораздо более серьезным и для многих неочевидным недостатком обладает квадратичный детектор. Дело в том, что распределение уклонов рельефа обладает длинными хвостами, т.е. очень крутые уклоны имеют хоть и маленькие, но ненулевые частоты появления. Как мы выяснили, для возвышенностей Марса распределение частот тангенса наклона профиля хорошо аппроксимируется распределением Коши в широком диапазоне уклонов от $0,3^\circ$ до 15° , в частности,

для крутых уклонов частота обратно пропорциональна квадрату тангенса наклона. (Для уклонов положе, чем $0,3^\circ$, распределение более острое, чем распределение Коши, а для уклонов круче, чем 15° , количество данных недостаточно для аппроксимации.) Как известно, для распределения Коши средний квадрат бесконечен, а значит, усреднение квадратов не может служить хорошей мерой шероховатости. На практике, наличие длинных хвостов распределения частот уклонов приводит к тому, что, по мере добавления новых и новых данных в ячейку карты, среднеквадратический уклон в этой ячейке систематически растет.

Другим традиционным методом является преобразование Фурье и усреднение спектра мощности. Легко сообразить, что в этом случае мы снова имеем дело с некоторым линейным фильтром и квадратичным детектором; последний неизбежно приводит ко всем только что описанным неприятностям.

Попробовав традиционные методы и разобравшись с их недостатками, мы, после нескольких попыток, остановились на межквартильной амплитуде кривизны профиля как мере шероховатости. Мы использовали базы, кратные удвоенному шагу между отсчетами высот вдоль профиля, практически, базы в 2, 8 и 32 шага, т.е. 0,6, 2,4 и 9,6 км. В качестве меры локальной неровности в данной точке мы использовали разность между средней высотой в двух точках, расположенных на полбазы вперед и полбазы назад по профилю, и высотой в данной точке (рис. 2.5.10 а):

$$c = \frac{1}{2} [h(x + l/2) + h(x - l/2)] - h(x), \quad (2)$$

где x – расстояние вдоль профиля, l – база и h – высота. Этот линейный фильтр дает, фактически, вторую производную, или кривизну профиля; он не пропускает региональные уклоны. Положительные значения величины c соответствуют вогнутым участкам профиля. Как обычно, дифференцирование экспериментальных данных сильно ухудшает отношение сигнал/шум, однако благодаря уникальной вертикальной точности вдоль орбит данные MOA благополучно выдерживают двукратное дифференцирование. Из всех возможных дважды дифференцирующих линейных фильтров мы выбрали простейший трехточечный, взвесив его принципиальные недостатки и практические преимущества, на которых мы не будем подробно останавливаться; укажем лишь, что для заданной базы он имеет окно минимальной ширины, что приводит к лучшей визуальной резкости получаемых карт. В качестве «детектора» мы применили межквартильную ширину распределения (рис. 2.5.10 в); иными словами, в каждой ячейке карты мы отбросили четверть точек с наиболее выпуклым рельефом и четверть точек с наиболее вогнутым рельефом (тем самым, избавившись от длинных хвостов распределения кривизны) и использовали амплитуду кривизны в оставшейся половине точек. Использование ранговых статистик (таких как квартили) является обычным подходом к статистическому описанию данных, имеющих распределения с длинными хвостами.

Разрешение получаемых карт ограничено пространственной плотностью отсчетов альтиметра и размером окна дифференцирующего фильтра. Наибольшая подробность карт шероховатости, которую нам удалось достичь, составляет 8 пикселей на градус, т. е. примерно 7,5 км на пиксел. Для самой длинной из использованных баз (9,6 км) фактическое разрешение карты несколько хуже, чем размер пиксела. Пример глобальной карты шероховатости для самой короткой базы показан на рис. 2.5.11. Еще одним удачным решением в этой работе стало представление карт шероховатости на трех базах в виде цветной карты. Шероховатость на трех базах (0,6, 2,4, 9,6 км) была закодирована на цветном изображении как интенсивность в трех цветовых каналах (синем, зеленом, красном, соответственно); более высокая интенсивность кодировала более высокую шероховатость; нелинейная, логарифмическая шкала использовалась для того, чтобы отразить вариации шероховатости как в ровных, так и в пересеченных районах. На таких картах общая яркость характеризует общую шероховатость, а цвет качественно показывает характер зависимости шероховатости от масштаба. Например, яркие голубые тона (характерные, например, для обширных областей, покрытых дюнами) говорят о том, что подавляющий вклад в рельеф вносит субкилометровая шероховатость, зеленые тона (типичные для северных равнин) показывают наличие характерного масштаба форм рельефа порядка 3 км, и т.д. Цветные карты шероховатости можно найти в Интернете <http://planetary.brown.edu/rough>.

Цветные карты шероховатости прекрасно отображают различные геолого-морфо-

логические типы местности на Марсе, и оказывают неоценимую помощь при анализе и картировании ландшафтов. Подчеркнем еще раз, что такие карты используют больше информации, чем карты рельефа, поэтому они показывают ландшафтные зоны и их границы лучше, чем анализ текстуры на картах рельефа. Очень интересный и важный эффект, обнаруженный при помощи карт шероховатости, – это глобальное сглаживание субкилометрового рельефа на высоких широтах, хорошо заметное на рис. 2.5.11. Оно, по всей видимости, вызывается наличием содержащих лед покровов на высоких широтах (Kreslavsky and Head, 2002); образование таких покровов связано с изменениями климата Марса (Head et al., 2003).

Интересно сравнить крупномасштабную шероховатость Марса с таким же способом вычисленной шероховатостью различных земных ландшафтов. Самые ровные участки Марса, некоторые относительно молодые вулканические равнины имеют шероховатость того же порядка, что и самые ровные равнины земных континентов, например, Придунайская и Прикаспийская низменности. Самые шероховатые участки Марса сравнимы с Карпатами и существенно уступают по шероховатости Кавказу и Альпам. Для Марса характерны значительно более разнообразные зависимости шероховатости от масштаба.

Обнаружение сильной анизотропии крутых склонов на Марсе

Потенциальные возможности данных MOLA для картирования статистических характеристик рельефа существенно шире, чем карты шероховатости, рассмотренные выше. Например, тот же самый фильтр с другим детектором использовался для картирования степени выпуклости (или вогнутости) рельефа. Здесь мы подробнее остановимся на работе по статистическому описанию асимметрии рельефа (Kreslavsky and Head, 2003).

Из-за того что аппарат находился на орбите, близкой к полярной, профили MOLA ориентированы под небольшим углом к меридиану. Это позволяет статистически сравнить крутизну склонов, обращенных на север и на юг. Мы использовали процедуру картирования, сходную с описанной выше. В качестве фильтра мы использовали выражение:

$$s = [h(x + l) - h(x)] - \frac{1}{3} [h(x + 2l) - h(x - l)]. \quad (3)$$

Фактически, это разность уклонов на базе l и на базе $3l$ (рис 2.5.10 б); будем называть эту величину дифференциальным уклоном. Если мы рассматриваем все профили в направлении с юга на север, то положительные s отвечают склонам, обращенным на юг, а отрицательные – на север. Мы использовали самую короткую из возможных баз $l = 0,3$ км. Ширина (например, межквартильная) распределения дифференциальных уклонов может служить мерой шероховатости. Если рельеф статистически изотропный, распределение дифференциальных уклонов будет симметрично относительно нуля. Существенная несимметричность распределения свидетельствует об анизотропии рельефа. В качестве параметра асимметрии мы выбрали медиану распределения, деленную на его межквартильную ширину (рис. 2.5.10 в). Медиана характеризует общее отклонение центра распределения от нуля, нормировка на ширину необходима, поскольку мы хотим сравнивать формы распределения как для ровных, так и для шероховатых областей. Положительная асимметрия означает, что суммарная длина участков профилей, обращенных к югу, больше, чем обращенных к северу, что, в свою очередь, означает, что в среднем склоны, обращенные к северу, круче, чем обращенные к югу. Аналогично, отрицательная асимметрия означает, что обращенные к югу склоны круче.

Полученная карта асимметрии склонов показана на рис. 2.5.12. Видно, что уровень шума параметра асимметрии очень велик. Для большей части планеты асимметрия колеблется около нуля. Несколько небольших участков систематически отрицательной асимметрии в северной приполярной области являются полями дюн, и анизотропия их рельефа прекрасно видна на изображениях высокого разрешения. Несколько участков систематически отличной от нуля асимметрии находятся в экваториальной зоне. Здесь анизотропия рельефа, скорее всего, тоже связана с действием ветра; она, однако, совершенно не очевидна на снимках высокого разрешения и ждет дальнейшего анализа. Наиболее интригующими областями анизотропного рельефа являются два узких пояса, примерно совпадающих с параллелями 47° в обоих полушариях, причем знак асимметрии в северном и южном полушариях противоположный: склоны, обращенные к экватору, круче, чем склоны, обращенные к полюсам. Эта симметрия полушарий и строгая широтная

зональность однозначно указывают, что первичная причина анизотропии так или иначе связана с климатом.

Чтобы лучше понять природу поясов анизотропии, мы рассмотрели большой, по возможности геологически однородный регион (Земля Киммерии) в возвышенностях южного полушария Марса и построили распределения дифференциальных уклонов в зависимости от широты. Рисунок 2.5.13 показывает баланс дифференциальных уклонов разного знака как функцию широты для уклонов различной крутизны. Параметр асимметрии, закартированный на рис. 2.5.12, относится, по методу определения, к уклонам наиболее типичной крутизны; для возвышенностей это уклоны в $1 - 2^\circ$. Широтные зависимости (рис. 2.5.13) для такой крутизны показывают пояс небольшого (несколько процентов) дисбаланса, и именно этот небольшой дисбаланс виден на карте (рис. 2.5.12). Из рис. 2.5.13 видно, что этот небольшой дисбаланс типичных уклонов является в некотором роде побочным, вторичным эффектом, он компенсирует значительно более сильный дисбаланс (противоположного знака) значительно более редких крутых склонов. Среди самых крутых склонов на широте 47° обращенные на север склоны встречаются втрое чаще, чем обращенные на юг.

Обнаруженная сильная асимметрия крутых дифференциальных уклонов побудила нас более детально проанализировать распределение крутых склонов различной ориентации, и мы обнаружили, что описанная выше сильная асимметрия крутых склонов сопровождается еще более сильным эффектом. Рисунок 2.5.14 показывает широтную зависимость количества крутых склонов на единицу площади для того же самого региона (Земля Киммерии). На высоких широтах крутые склоны практически отсутствуют. Если мы движемся от экватора к полюсу, количество крутых склонов падает более чем на два порядка, причем это падение происходит раньше, т.е. на более высоких широтах, для склонов, обращенных к полюсу, и позже – для противоположных склонов, что и порождает обнаруженную ранее асимметрию. Вне Земли Киммерии существенные ландшафтные вариации усложняют картину, однако эффект столь силен, что он отлично прослеживается по всей планете, в обоих полушариях.

Крутые склоны образовывались в течение геологической истории Марса за счет тектонических процессов, эрозионных процессов и образования ударных кратеров. Последний процесс порождает крутые склоны непрерывно и повсеместно. Поэтому практически полное отсутствие крутых склонов на высоких широтах означает, что существует некоторый механизм удаления крутых склонов, действующий только на высоких широтах (причем сами кратеры и прочие формы рельефа не удаляются, но их склоны становятся много положе). Поскольку этот механизм имеет строгую широтную зональность, он необходимо связан с климатом; поскольку он чувствителен к ориентации склона, он непосредственно связан с инсоляцией, т.е. с режимом освещения Солнцем. Географически высокоширотные области без крутых склонов почти совпадают с областями пониженной субкилометровой шероховатости (описанной выше). Не следует, однако, безапелляционно отождествлять эти два эффекта. Параметр шероховатости имеет дело с типичными уклонами поверхности, которые, даже для шероховатых областей, не превосходят $1 - 2^\circ$; соответственно, вертикальный масштаб рельефа, ответственный за высокоширотное сглаживание, составляет порядка нескольких метров. Деграция крутых склонов связана с вертикальными изменениями рельефа порядка сотен метров. Таким образом, отсутствие крутых склонов и сглаживание пологого субкилометрового рельефа вполне могут быть не связаны генетически.

Механизм, удаляющий крутые склоны на высоких широтах, – это, вероятно, сезонное оттаивание поверхности на высоких широтах в особые эпохи в геологическом прошлом. В настоящее время поверхность Марса находится в глубоко замерзшем состоянии. Несмотря на то, что в сезон перигелия на низких широтах в послеполуденное время температура поверхности достигает $+20 - +35^\circ\text{C}$, среднесуточная температура поверхности нигде на планете никогда не превышает -20°C , поэтому оттаивать днем может только очень тонкий приповерхностный слой (фактически, всюду, где дневная температура превышает 0°C , верхний слой грунта совершенно лишен льда, и переход температуры через 0°C не вызывает, как считается, никаких особых эффектов). Небесномеханические расчеты показывают, что наклон оси вращения Марса к плоскости его орбиты (равный $\sim 25^\circ$ в нынешнюю эпоху) меняется сложным образом [5]; хаотическая природа динамики Солнечной системы делает невозможными точные расчеты этих изменений, однако ясно, что в прошлом весьма вероятны периоды, когда наклон оси вращения был существенно выше, чем сейчас. Инсоляция, а, следовательно, температура поверхности на низких широтах слабо зависит от наклона оси вращения. На высоких широтах при большом наклоне оси

вращения летом инсоляция поверхности велика, и среднесуточная температура должна превышать 0°C (скорее всего, для этого требуются наклоны более $\sim 40 - 50^{\circ}$; среднегодовая же температура поверхности всегда остается много ниже 0°C). Сезонное оттаивание и промерзание слоя толщиной в дециметры и метры способствует дезинтеграции пород и интенсивной эрозии, так же, как это происходит в областях вечной мерзлоты на Земле, и способствует интенсивной деградации крутых склонов. При большом наклоне оси вращения на средних широтах летом крутые склоны, обращенные к полюсу, получают существенно большую инсоляцию, чем склоны, обращенные к экватору. (Это противоположно нашему интуитивному представлению о теплых южных и холодных северных склонах, причем не столько потому, что наша планета имеет меньший наклон оси вращения, сколько потому, что мы обращаем внимание на разницу между южными и северными склонами не летом, а ранней весной, когда сходит снег.) Благодаря большей летней инсоляции на склонах, обращенных к полюсам, граница сезонного оттаивания для таких склонов продвинута ближе к экватору, что и вызывает несимметричную деградацию склонов.

Панорамная поляриметрия Марса при помощи телескопа Хаббла

Цикл работ по обработке изображений Марса, полученных при помощи орбитального Космического телескопа Хаббла (HST) (Shkuratov et al., 2005, Kaydash et al., 2006) имеет гораздо более «астрономический» характер. Представитель харьковских астрономов (Ю. Г. Шкуратов) входил в команду астрономов и планетологов, возглавляемую проф. Дж. Бэллом из Корнельского университета, выигравшую конкурс на наблюдательное время на HST для наблюдений Марса в противостояние 2003 г. В рамках этой программы харьковчане отвечали за анализ поляриметрических наблюдений Марса.

Были выполнены пять серий наблюдений: 24 августа, непосредственно перед противостоянием, а также после него, 5, 7, 12 и 15 сентября. Фазовые углы Марса составляли $6,4^{\circ}$, $8,2^{\circ}$, $9,7^{\circ}$, $13,6^{\circ}$ и $15,9^{\circ}$, соответственно. Время наблюдений было выбрано так, чтобы к Земле было обращено одно и то же полушарие Марса (центр видимого диска имел координаты 19° ю.ш., $20 - 35^{\circ}$ з.д.). Наблюдения проводились при помощи приемника HRC камеры ACS. Приемник представляет собой уникальную ПЗС-матрицу с высокой чувствительностью и отношением сигнал/шум размером в 1 мегапиксел. Диаметр диска Марса на приемнике изменялся в течение периода наблюдений от 1010 до 950 пикселов; масштаб изображения в центре диска был порядка 7 км на пиксел, и фактическое разрешение было того же порядка. Это рекордное разрешение на Марсе, полученное астрономическими методами с Земли; полученные изображения – это единственные астрономические изображения, на которых различима Долина Маринера и некоторые крупные ударные кратеры.

Поляриметрическая часть программы наблюдений в каждой из пяти серий включала изображения в четырех широких спектральных фильтрах F250W, F330W, F435W и F814W; число в идентификаторе фильтра соответствует характерной длине волны в нм, таким образом, набор фильтров включал два УФ, голубой и ИК фильтры. Минимальная технически возможная экспозиция оказалась слишком длинной для ИК фильтра, яркие детали вышли из динамического диапазона приемника, поэтому ИК изображения были мало пригодны для дальнейшего количественного анализа. Пример изображения в голубом фильтре показан на рис. 2.5.15. Уменьшенные изображения в ближнем УФ фильтре из всех пяти серий наблюдений показаны на рис. 2.5.15 (верхний ряд). В южной части диска видна сезонная полярная шапка, которая уменьшается в размерах в течение периода наблюдений. Высокие северные широты скрыты плотной облачностью. Контраст деталей на поверхности в УФ фильтрах существенно ниже, чем в голубом, за счет сильного рассеяния и поглощения в атмосфере. В центральной и западной (утренней) части диска наблюдаются обширные системы очень неплотных, светлых, часто полупрозрачных облаков; их плотность и конфигурация меняются от даты к дате.

В каждом из четырех спектральных фильтров было получено по три изображения с тремя различными поляризационными фильтрами, поляризационные оси которых повернуты на 60° друг к другу. Нашей задачей было картирование степени линейной поляризации на основе этих изображений. Обработка данных начиналась со стандартной процедуры первичной калибровки изображений, которая включала компенсацию темнового заряда, плоского поля и геометрических искажений. Затем мы применили специально для этого разработанные эвристические алгоритмы обнаружения треков космических лучей на

изображениях. Стандартная программа калибровки изображений камеры ACS предусматривает обнаружение треков на основе сравнения двух и более идентичных экспозиций одного и того же участка неба. К Марсу эта часть стандартной программы неприменима, поскольку Марс движется и поворачивается между последовательными экспозициями. После этого мы совместили между собой каждую тройку изображений. Эта задача также оказалась нетривиальной: Марс поворачивается между экспозициями, а точность знания положения HST на околоземной орбите и, следовательно, горизонтального параллакса Марса не достаточна для того, чтобы рассчитать требуемую геометрическую трансформацию с нужной точностью. Нам пришлось уточнять совмещение, пользуясь видимыми деталями на поверхности. Для этого мы использовали оригинальный алгоритм, максимизирующий локальную корреляцию изображений. Наконец, на основании небольших разностей между тройкой изображений, полученных в разных поляризационных фильтрах, мы вычисляли степень линейной поляризации.

Камера ACS не проектировалась как специальный поляриметрический инструмент. Она находится в боковом фокусе телескопа; свет отводится в этот фокус зеркалом, расположенным под большим углом к оптической оси, что порождает очень сильную (до 9%) инструментальную поляризацию. Зеркало имеет сложное диэлектрическое покрытие, из-за которого инструментальная поляризация имеет сильную и немонотонную спектральную зависимость. При сборке камеры положение осей поляризационных фильтров не было задокументировано, и, следовательно, позиционные углы плоскостей поляризации фильтров в поле зрения камеры неизвестны. Из сказанного, с учетом того, что степень поляризации Марса при небольших фазовых углах не превосходит нескольких процентов, ясно, что поляриметрическая калибровка наблюдений представляла собой наибольшую проблему в нашей работе. Усилия создателей камеры по поляриметрической калибровке до настоящего момента не привели к результату, которым мы могли бы надежно воспользоваться. Однако некоторое количество специальных калибровочных наблюдений было проведено, и мы воспользовались ими для того, чтобы откалибровать наблюдения. К наблюдениям стандартных звезд мы добавили сами наблюдения Марса: соображения симметрии требуют, чтобы в центре диска плоскость поляризации либо совпадала, либо была перпендикулярна плоскости падения, что дает дополнительное условие для калибровки, особо важное, поскольку в этом случае спектры объекта и стандарта совпадают. Мы отказались от построения адекватной модели, учитывающей поляризацию на главном зеркале, на отклоняющем зеркале и в фильтрах, как это пытаются сделать создатели камеры, и рассмотрели всю систему, состоящую из телескопа, фильтра и приемника как линейный «черный ящик». Поскольку круговая поляризация Марса пренебрежимо мала, линейная связь между тремя параметрами Стокса, описывающими интенсивность и состояние линейной поляризации источника, и тремя отсчетами яркости в трех поляризационных фильтрах, описывается матрицей 3×3 из 9 элементов. Имеющихся калибровочных наблюдений недостаточно для определения этих 9 элементов. Если мы учтем, что степень поляризации объекта мала, и будем интересоваться только состоянием поляризации, а не абсолютной яркостью, то окажется достаточно всего 4-х нетривиальных параметров, описывающих «черный ящик». Калибровочных наблюдений с избытком хватает для определения этих параметров, причем наблюдения оказываются сильно несовместными друг с другом. Причина этого кроется в сильной разнице спектров стандартных звезд и сильной спектральной зависимости инструментальной поляризации. После того, как мы исключили самую голубую из стандартных звезд, калибровочные наблюдения стали неплохо согласоваться между собой, что позволило нам определить параметры «черного ящика» и тем самым откалибровать карты поляризации.

Полученные карты поляризации показаны на рис. 2.5.16 (нижний ряд); более светлые тона показывают более сильную отрицательную поляризацию. В синем фильтре, где вклад поверхности велик, южная полярная шапка поляризует рассеянный свет существенно слабее, чем прочие части диска, как следовало ожидать для объекта с высоким альбедо. В УФ фильтрах эта разница в поляризации шапки слабее, поскольку вклад поверхности в рассеянный свет меньше. Никаких других пространственных вариаций степени поляризации, которые мы могли бы отнести к деталям поверхности, мы, к нашему разочарованию, не обнаружили. Зато слабые утренние облака подарили нам неожиданно сильный эффект: некоторые области в западной половине диска 5 и 7 сентября показали исключительно сильную отрицательную поляризацию. Эффект особенно сильно

проявляется в УФ фильтрах, поляризация местами доходила до 2,5 %. Изменчивый характер этих аномальных областей однозначно указывает на атмосферные аэрозоли, причем скорее на кристаллы льда, способные конденсироваться и испаряться, чем на пыль. На УФ изображениях хорошо видно, что сильно поляризованные области ассоциируются с некоторыми полупрозрачными облаками, но не со всеми; плотные облака не проявляют аномальной поляризации. В синем фильтре аномальная поляризация слабее, а облака местами совсем прозрачны. Низкая оптическая плотность и высокая степень поляризации указывают на удивительно высокую поляризующую способность частиц аэрозоля, что потенциально может наложить существенные ограничения на размеры и свойства частиц. Дальнейший теоретический анализ этих наблюдений может дать важные результаты для понимания микрофизики марсианских облаков и, как следствие, для моделирования климата.

Уникальное разрешение и качество наблюдений Марса на телескопе Хаббла открыло еще один путь для обработки и анализа (Kaydash et al., 2006). В фильтре F330W хорошо видна тонкая структура утренних облаков. За 4 минуты между первой и последней (третьей) экспозицией в различных поляризационных фильтрах облачные структуры заметно смещались по отношению к деталям поверхности. Эти смещения были невелики, порядка 1 – 3 пиксела, однако, поскольку тонкая структура облаков не успевала измениться за это короткое время, используя большие окна (практически, 50 пикселей в диаметре), нам удалось измерить смещения с точностью существенно выше, чем один пиксел (в обмен на снижение пространственного разрешения). Мы использовали наши алгоритмы совмещения по максимуму взаимной корреляции изображений; повозившись с подбором параметров этой процедуры, нам удалось определить смещения в 650 точках за все 5 дней наблюдения.

Смещения облаков вызываются ветром. В принципе, это не всегда так: видимые смещения облаков могут быть не связаны с механическим перемещением аэрозолей вместе с воздушными массами; это может быть процесс типа волнового, т.е. смещение фронтов конденсации и испарения. Однако в нашем случае, поскольку сохраняется тонкая структура облаков и скорость перемещения велика, мы почти наверняка имеем дело с ветром. Измеренные смещения позволили построить карты ветров (рис. 2.5.17 A-E). Типичные измеренные скорости ветра составляют ~ 40 м/с; хотя точность наших измерений невелика (~ 10 м/с по скорости, ~ 15° по направлению), карты показывают систематические региональные изменения скорости ветра и различия в полях ветров в различные дни наблюдений.

Эти карты дают скорость ветра на высоте облаков, которая неизвестна. Мы сравнили полученные нами поля скоростей с данными из Климатической базы данных Марса (<http://www.lmd.jussieu.fr/mars.html>), которая дает «среднемесячные» значения скоростей ветра для данного сезона и времени суток на разных высотах (рис. 2.5.17 F). Эта база данных получена по расчетам при помощи числовой модели циркуляции атмосферы; параметры этой модели подогнаны так, чтобы модель удовлетворяла большинству доступных погодных данных. Глобально, преобладание восточных ветров по нашим измерениям согласуется с базой данных. Скорость ветра растет с высотой, и по средней скорости восточных ветров видно, что облака находятся на высотах 30 – 40 километров. Наблюдаемые отличия поля скоростей ветра на этих высотах для пяти дат наблюдений друг от друга и от «среднемесячных» значений отображают погодные вариации. Измеренные поля ветров могут быть использованы для дальнейшего детального анализа совместно с моделями циркуляции атмосферы.

Заключительные замечания

Работы по обработке данных космических миссий продолжаются. Общий объем данных о планетах быстро растет, грубая оценка показывает, что в среднем за последние 5 – 7 лет он утраивается за год. Авторы космических экспериментов, «хозяева» данных, все менее и менее углубляются в детальный количественный анализ, ограничиваясь «снятием сливок», публикацией наиболее интересных и ярких, но лишь очевидных и поверхностных результатов. В ближайшие год-два поток данных достигнет такого уровня, когда времени исследователей не будет хватать для того, чтобы просто просмотреть приходящие данные. Огромное количество интереснейших фактов останется закопанным в мегабайтах чисел. К счастью, политика космических агентств США и Европейского союза (NASA и ESA) такова, что все получаемые данные о планетах быстро становятся доступными для независимого

анализа. В этих условиях у харьковских ученых, аспирантов и студентов есть широчайшие возможности, немного копнув вглубь, добывать новые удивительные результаты и вносить существенный вклад в мировую планетологию.

Литература

- [1] *Muhlemann D. O.* Radar scattering from Venus and the Moon // *Astron. J.* – 1964. – V. 69. – P. 34 – 41.
- [2] *Weitz C. M., Plaut J. J., Greeley R., Saunders R. S.* Dunes and microdunes on Venus: Why were so few found in the Magellan data? // *Icarus.* – 1994. – 112. – P. 282-295.
- [3] *Neumann G. A., Rowlands D. D., Lemoine F. G., Smith D. E., Zuber M. T.* Crossover analysis of Mars Orbiter Laser Altimeter data // *J. Geophys. Res.* – 2001. – 106. – P. 23753-23768.
- [4] *Orosei R., Bianchi R., Coradini A., Espinasse S., Federico C., Ferriccioni A., Gavrishin A. I.* Self-affine behavior of Martian topography at kilometer scale from Mars Orbiter Laser Altimeter data // *J. Geophys. Res.* 2003. 108 No. E4, DOI: 10.1029/2002JE001883.
- [5] *Laskar J., Correia A., Gastineau M., Joutel F., Levrard B., Robutel P.* Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars // *Icarus.* – 2004. – 170. – P. 343-364.