Картографирование расчлененности поверхности Луны на основе глобальной цифровой модели рельефа GLD100

А.А. Коханов¹, М.А. Креславский^{1,2}, И.П. Карачевцева¹, Е.Н. Матвеев¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия E-mail: s_kokhanov@mexlab.ru, i_karachevtseva@mexlab.ru ² Университет Калифорнии – Санта Круз, Санта Круз, США E-mail: mkreslav@.ucsc.edu

В работе представлены методы и результаты вычисления одного из статистических параметров рельефа – топографической расчлененности (или шероховатости). Исследования выполнены с использованием глобальной цифровой модели рельефа Луны «Global Lunar DTM» (GLD100), полученной на основе фотограмметрической обработки космических стереоизображений широкоугольной камеры (Wide Angle Camera (WAC), установленной на борту космического аппарата Reconnaissance Orbiter (LRO). Подробно описаны критерии выбора и оценки статистических характеристик, проведен сравнительный анализ полученных параметров с аналогичными вычислениями по данным лазерной альтиметрии Луны Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA). По результатам работ созданы глобальные карты расчлененности поверхности Луны.

Ключевые слова: Луна, ЦМР GLD100, LRO WAC, статистические характеристики рельефа, топографическая расчлененность, планетная картография, ГИС.

Введение

Картографирование статистических характеристик рельефа является важным инструментом в геологических исследованиях небесных тел Солнечной системы (Aharonson et al., 1998; Smith et al., 1999; Aharonson et al., 2001; Malamud and Turcotte, 2000; Kreslavsky, 2010). Статистический анализ рельефа позволяет объективно характеризовать различные геологические провинции и объекты, помогает в их классификации и в некоторых случаях может предоставить ключ к их природе и происхождению.

В настоящей работе предложена методика построения карт наиболее распространенной характеристики рельефа – степени его расчлененности, полученной на основе фотограмметрической обработки данных дистанционного зондирования Луны. Недавно уже были созданы глобальные карты с отображением меры расчлененности поверхности Луны по данным орбитальных лазерных альтиметров LALT на борту японского искусственного спутника Луны Kaguya (Kreslavsky, 2010) и LOLA на борту американского спутника LRO (Rosenburg et al., 2011; Kreslavsky, Head, 2012; Kreslavsky et al., 2013). Результаты нашей работы основаны на данных, принципиально отличающихся от использованных ранее. Новые карты степени расчлененности поверхности получены на основе цифровых моделей рельефа (ЦМР), созданных фотограмметрическим методом по кадровым стереоизображениям LRO WAC. Помимо создания оригинальных карт, данное исследование имеет большое методическое значение, поскольку ЦМР, полученные из фотограмметрической обработки космических стереоизображений, более распространены как для тел Солнечной системы, так и для Земли, чем ЦМР, созданные по данным лазерной альтиметрии. Мы обсуждаем также преимущества и недостатки этих двух разных источников исходных данных.

1. Критерии выбора статистических характеристик

Успех применения методов статистического анализа рельефа и картографирования его характеристик во многом зависит от удачного выбора картографируемых статистических параметров. Это является сложной задачей, поскольку не существует универсальных методов, которые обеспечили бы получение хороших результатов во всех случаях. Выбор зависит от особенностей исходных данных, целей анализа, а также предпочтений исследователя. В данном разделе приводятся критерии, позволяющие, во-первых, качественно оценить, насколько отвечают выбранные статистические характеристики тем или иным задачам, и, во-вторых, сравнить различные их варианты.

Каждый из критериев сначала сформулирован в общем виде, а затем более подробно раскрыт на примере наиболее известного статистического параметра рельефа – степени расчлененности. Нами используются два его наименования в качестве синонимичных: (1) «расчлененность» поверхности – русскоязычный геоморфологический термин для характеристики колебаний относительных высот в пределах изучаемого участка; (2) «шероховатость» поверхности – калька английского термина «roughness», применяемого в том же значении.

Адекватность. Выбираемая статистическая характеристика должна быть интуитивно понятной; анализируемая или картографируемая величина должна быть удобной для понимания и интерпретации. Например, параметр, характеризующий степень расчлененности поверхности на заданном масштабе, должен соответствовать интуитивному представлению исследователя о шероховатости поверхности; очевидно, что гладкая (на заданном масштабе) поверхность должна иметь параметр расчлененности ниже, чем неровная (на том же масштабе) поверхность. Несмотря на кажущуюся очевидность, этот критерий непрост для применения, поскольку содержит элемент субъективности, связанный с тем, что интуитивные представления различных исследователей о расчлененности поверхности могут существенно различаться. Это приводит к тому, что выбор параметров оказывается неоднозначным, отражая индивидуальные особенности исследователя.

Симметрия. Выбираемая статистическая характеристика должна удовлетворять требованиям масштабирования и симметрии. Например, если необходимо оценить расчлененность плоской в среднем поверхности, умножение всех высот на некоторый коэффициент должно увеличить расчлененность поверхности на такую же величину, а другие изменения (такие, как сдвиг высот поверхности, поворот вокруг произвольной вертикальной оси, наклон поверхности и т.д.) не должны ее изменять. Так, например, наклон поверхности меняет среднеквадратический разброс высот (в зависимости от базы), поэтому данный параметр не всегда является хорошей характеристикой расчленённости поверхности.

Типичность. Выбираемая статистическая характеристика должна характеризовать типичную поверхность, а не выделять особенности местности. Как уже указывалось выше, возможность с помощью статистического анализа описывать типичные формы рельефа, не затрагивая объекты, хорошо заметные и без применения статистических

методов, и является важным аргументом в пользу применения последних. Однако не все статистические характеристики обладают этим полезным свойством. Например, такая популярная статистическая характеристика расчлененности поверхности как среднеквадратический уклон (на определенной базе) с точки зрения типичности не является хорошей, поскольку присутствие небольшой доли очень больших склонов сильно увеличивает этот средний квадрат уклона, характеризуя наличие нетипичных крутых объектов, а не типичную расчленённость поверхности. Вместе с тем на локальном уровне при наличии ЦМР высокого разрешении этот параметр дает хорошие результаты для выявления малых кратеров и автоматизированной оценки степени кратерированности территории (Карачевцева и др., 2012).

Определенность масштаба. Выбираемая статистическая характеристика должна характеризовать рельеф на определенном пространственном масштабе. Например, топографическая расчлененность имеет смысл только на каком-то пространственном масштабе, что само по себе является важной диагностической характеристикой рельефа. Перегибы кривой зависимости расчлененности поверхности от масштаба помогают обнаружить характерные горизонтальные размеры, присущие рельефу конкретной местности. В приведенных выше примерах совсем неслучайно подчеркивалось, что, например, уклоны рассматриваются на некоторой определенной базе, что как раз и обеспечивает определенность масштаба.

Устойчивость. Выбираемая статистическая характеристика должна быть устойчива в следующем смысле: статистические характеристики, вычисленные по большому, геологически однородному участку в целом и отдельно, по нескольким типичным его частям, должны быть достаточно близки друг к другу. Требование устойчивости близко к требованию типичности, рассмотренному выше, но неидентично ему. Примером статистической характеристики, не удовлетворяющей критерию устойчивости, является мера расчлененности поверхности, рассчитанная как среднеквадратический уклон на некоторой базе. Как правило, уклоны на природных поверхностях имеют распределения с «тяжелыми хвостами», т.е. доля уклонов, существенно (в несколько раз) превосходящих типичные уклоны, является относительно большой по сравнению, скажем, с рэлеевским распределением (аналог гауссова распределения для уклонов). Так, например, на экваториальных, сильно кратерированных, возвышенностях Марса типичные уклоны на километровой базе составляют около 2°, и в широком диапазоне уклонов от 2 до 35° частота встречаемости уклонов хорошо аппроксимируется обратным квадратом тангенса уклона; для такого распределения формально вычисленный среднеквадратический уклон бесконечен. Практически это приводит к тому, что среднеквадратический уклон, вычисленный на небольших участках однородной поверхности, оказывается систематически ниже, чем вычисленный по большим участкам той же самой поверхности (Kreslavsky, Head, 2003).

Толерантность. Выбираемая статистическая характеристика должна быть устойчива по отношению к погрешностям и особенностям исходных данных. Это требование, хотя и оказалось одним из последних, на практике часто оказывается определяющим: лучшая по прочим критериям статистическая характеристика бессмысленна, если погрешности реальных данных не позволяют вычислить ее с разумной надежностью. Критерий

толерантности приводит к тому, что вследствие особенностей различных исходных источников приходится применять разные характеристики.

Если речь идет о картографическом отображении полученных статистических характеристик рельефа, то к перечисленным выше критериям добавляются еще два важнейших требования: уровень шума и резкость. Это связано с тем, что карты, являющиеся результатом обработки топографических данных, предназначены для визуального анализа и визуального сравнения с другими пространственными данными.

Низкий шум. Выбираемая статистическая характеристика должна обеспечить по возможности низкий уровень шума при отображении пространственного распределения характеристики. Частично это требование совпадает с требованием устойчивости: неустойчивые статистические характеристики неизбежно порождают высокий шум. Практически, однако, ограничение на шум не сводится к требованию устойчивости.

Зрительная резкость. Выбираемый статистический параметр должен обеспечить формирование картографических изображений пространственных распределений, которые выглядят зрительно резкими. Опыт работы с продуктами обработки данных о планетных поверхностях показывает, что зрительная резкость результирующих изображений является ключевым фактором для успешного использования результата в научных целях.

Перечисленные выше критерии часто являются противоречивыми. Например, фильтрация шумов неизбежно приводит к снижению зрительной резкости. Как свидетельствуют представленные ниже результаты, этот выбор может быть неоднозначным. Таким образом, при выборе статистических характеристик и алгоритмов обработки данных приходится жертвовать некоторыми качествами и находить вариант оптимального баланса между достоинствами и недостатками в соответствии с поставленными задачами исследований.

2. Обработка исходных данных

Вычисление статистических характеристик лунной поверхности проводилось с использованием цифровой модели рельефа «Global Lunar DTM» или GLD100 (Scholten et al., 2012), созданной фотограмметрическими методами по результатам стереосъемки широкоугольной камерой LRO WAC (Robinson et al., 2010) с борта искусственного спутника Луны LRO. Разрешение исходных изображений составляет около 75 м/пиксел. Исходная ЦМР GLD100 предоставляется в отдельных файлах: в равнопромежуточной вдоль меридианов цилиндрической проекции с покрытием 90° по долготе и 60° по широте для средних широт ($\pm 60^{\circ}$) и для полярных областей – в стереографической проекции (http://wms.lroc. asu.edu/lroc/global_product/256_ppd_DEM). Для удобства использования метода скользящего окна в работе использовалась ЦМР с разрешением 256 пикселов на 1° (118 м/пиксел).

Поскольку алгоритмы фильтрации реализованы на матрице высот с квадратной ячейкой (пиксел), то критерии адекватности и симметрии требуют, чтобы геометрические искажения, связанные с представлением поля высот, были невелики. Для количественной оценки мы ввели следующее ограничение – линейные искажения на всей исследуемой

территории (вся поверхность Луны) не превышают 10%. Для выполнения этого условия при отображении экваториальной области (\pm 60°) использована исходная равнопромежуточная вдоль меридианов цилиндрическая проекция. Искажения длин вдоль параллелей в выбранной проекции при отображении поверхности шара вычисляются по формуле: n = cos φ_k sec φ , где φ_k – главная параллель, φ – параллель, на которой вычисляются искажения (Бугаевский, 1998). Расчеты показывают, что для сохранения линейных искажений вдоль параллелей в пределах 10% размер участка не должен превышать 40° вдоль меридиана при главной параллели 0°.

Исходя из этих условий, исходная ЦМР GLD100 была представлена в виде отдельных фрагментов на различные участки поверхности Луны (см. схему нарезки, *рис. 1*). Для двух крупных регионов с границами вдоль 20°-ной северной и южной параллелей, где исходная проекция не изменялась, линейные искажения составляют 6,4%. На полярных участках проекция исходной ЦМР не изменялась, так как в стереографической проекции искажения длин на 60-ной параллели составляют 7,2%, что отвечает поставленному условию.

				60°
				50°
	L			
				50
				40°
				30°
				0
				20°
			+	30°
				/10°
Г				
+	+			50°
				55°
				60°
180°	270°	0°	90°	180°

Рис. 1. Схема нарезки ЦМР GLD100 на широтные пояса. Сплошными линиями обозначены границы фрагментов исходной ЦМР GLD100, пунктирными – линии их нарезки

Остальная территория была разделена на широтные зоны размером 5 и 10° и спроецирована в равнопромежуточную вдоль меридианов цилиндрическую проекцию с главной параллелью, проходящей через центральную параллель каждого участка. Такой подход обеспечил выполнение условий о допустимых краевых искажениях длин. Предельные линейные искажения в зависимости от широты, а также границы участков, приведены в *табл. 1*. Нарезка и проецирование ЦМР GLD100 проводилось в ГИС ArcGIS 10.1 (ESRITM). В результате получены отдельные фрагменты ЦМР на 50 участков поверхности Луны.

Главная параллель	Граничные параллели	Линейные искажения (%)
0°	± 20°	6,4
1.250	± 20°	-3,6
± 23	± 30°	4,7
⊥ 25°	± 30°	-5,4
± 55	± 40°	6,9
1 450	± 40°	-7,7
± 43	± 50°	10
± 52.5°	±50°	-5,3
± 52,5	± 55°	6,1
± 57.5°	± 55°	-6,3
± 57,5	± 60°	7,5

Таблица 1. Характеристика искажений по краям фрагментов ЦМР на разных широтах

В нашем исследовании для оценки меры расчлененности поверхности при обработке ЦМР использованы четыре различных фильтра. В методических целях для сравнения с другими предложенными фильтрами в качестве первого мы рассмотрели отсутствие какой-либо фильтрации и оценивали распределение значений высот (h). Очевидно, такой тривиальный «фильтр» не обеспечивает определенность масштаба.

Второй фильтр – это вычисление уклонов, что обеспечивается при однократном дифференцировании матрицы высот. В общем виде первая производная поля высот – это двумерный вектор градиента. Для обеспечения симметрии использовался инвариант, связанный с этим вектором – его длина, которая является значением уклона (S).

Третий и четвертый фильтры основаны на применении двукратного дифференцирования матрицы высот. В общем виде вторая производная поля высот – это матрица Гесса, симметричная матрица размерности 2×2, составленная из вторых частных производных. Такая матрица имеет два инварианта: ее след и определитель. След матрицы Гесса – это лапласиан поля высот (L). Лапласиан является линейным фильтром, тогда как определитель матрицы Гесса, или гессиан (H), является нелинейным. (Во избежание путаницы заметим, что некоторые авторы используют термин «гессиан» для обозначения всей матрицы Гесса; в настоящей работе мы используем этот термин для обозначения определителя матрицы Гесса.)

Для оценки меры расчлененности поверхности мы предложили вычисление межквартильного размаха предложенных выше параметров (h, S, L, H). Применение этого способа для построения карт степени расчлененности поверхности по данным лазерной альтиметрии (Kreslavsky, Head, 2000; Kreslavsky et al., 2013) дало превосходные результаты с точки зрения критериев устойчивости, типичности и зрительной резкости. У нас есть все основания ожидать этого и для данных, используемых в настоящей работе.

При оценке параметров шероховатости с использованием каждого из четырех перечисленных выше показателей (*h*, *S*, *L*, *H*) вычислялся их межквартильный размах

в скользящем круглом окне радиусом 23 пиксела. Выбранный размер окна примерно равен 16 $\sqrt{2}$, что является минимальным радиусом, обеспечивающим вычисление межквартильного размаха без потери информации. При использовании скользящего окна разрешение итоговых файлов снижается в 32 раза, до 8 пикселов/градус (или 3,8 км/пиксел). После расчетов производилась «сшивка» отдельных зон с получением распределений параметров расчлененности поверхности в двенадцати широтных поясах и двух полярных областях (*puc. 1*).

Далее растровые продукты загружались в ГИС, где средствами ArcGIS 10.1 обеспечивалась пространственная привязка данных, их перепроецирование на лету в выбранную проекцию и сшивка (мозаицирование) в единое изображение. В результате получены глобальные карты шероховатости на всю поверхность Луны с отображением каждого из четырех вычисленных статистических параметров рельефа (*puc.* 7–10). Анализ этих пространственных данных в ГИС обеспечил возможность попиксельного сравнения различных характеристик степени топографической расчлененности поверхности естественного спутника Земли.

3. Оценка результатов и сравнение с данными LOLA

С использованием качественных и количественных критериев мы сравнили новые карты степени расчлененности поверхности между собой, а также выполнили их сравнение с картами, полученными в работе (Kreslavsky et al., 2013) по данным лазерного альтиметра LOLA (Smith et al., 2010). В качестве меры расчлененности поверхности при создании карт на основе лазерной альтиметрии использовался межквартильный размах второй производной высот, вычисленной на разных базах (115 м, 0.46 км и 1,8 км) вдоль профилей, полученных прибором LOLA. Качественно в первом приближении все карты (кроме карты по данным LOLA с базой 115 м) похожи в том смысле, что поверхности лунных морей являются намного менее расчлененными, чем поверхности лунных материков, что, очевидно, соответствует интуитивному представлению о расчлененности поверхности. На самой короткой базе 115 м различие между морями и материками исчезает, что подробно рассмотрено в работе (Kreslavsky et al., 2013), хотя при более детальном анализе расхождения все же можно обнаружить.

Для количественного сравнения результатов определения статистических характеристик, выполненных в данном исследовании по GLD100, с картами расчлененности поверхности, полученных по данным LOLA, вычислен линейный коэффициент корреляции. Анализ корреляционной матрицы (*maбл. 2*) показывает, что корреляция статистических характеристик возрастает с увеличением степени вычисляемой производной. Так, среди всех полученных параметров расчлененности поверхности, построенных по данным GLD100, лучше всего коррелируют между собой такие характеристики как размах лапласиана (L) и гессиана (H). Это говорит о том, что вычисление вгорой производной рельефа дает схожие результаты вне зависимости от метода вычисления и подтверждает правильный выбор такого показателя, как межквартильный размах для характеристики расчленённости поверхности. Схожесть показателей лапласиана (L) и гессиана (H) также иллюстрируется диаграммой рассеяния (*puc. 2*), где более светлый тон обозначает более частую встречаемость соответствующей комбинации параметров (значения пикселей на всех диаграммах представлены в условных единицах). На *puc. 2* хорошо заметна нелинейная параболическая зависимость; эта нелинейность приводит к занижению линейного коэффициента корреляции (*maбл. 2*), так что фактическая корреляция оказывается лучше. Параболический характер зависимости объясняется тем, что лапласиан (L) линеен по вторым производным, а гессиан (H) – квадратичен.

Наименование параметров	LOLA, база 115 м	LOLA, база 0,46 км	LOLA, база 1,8 км	GLD100, высоты (h)	GLD100, уклоны на базе 230 м (S)	GLD100, лапласиан на базе 0,46 км (L)	GLD100, гессиан на базе 0,46 км (Н)
LOLA, база 115 м	1,00	0,57	0,29	0,19	0,23	0,25	0,22
LOLA, база 0,46 км	0,57	1,00	0,65	0,12	0,29	0,39	0,33
LOLA, база 1,8 км	0,29	0,65	1,00	0,40	0,56	0,71	0,63
GLD100, высоты	0,19	0,12	0,40	1,00	0,61	0,67	0,61
GLD100, уклоны на базе 230 м	0,23	0,29	0,56	0,61	1,00	0,74	0,67
GLD100, лапласиан на базе 0,46 км	0,25	0,39	0,71	0,67	0,74	1,00	0,89
Гессиан на базе 0,46 км.	0,22	0,33	0,63	0,61	0,67	0,89	1,00

Таблица 2. Корреляционная матрица значений расчлененности поверхности



Рис. 2. Диаграмма рассеяния значений расчлененности рельефа при вычислении межквартильного размаха лапласиана (L) и гессиана (H) по GLD100

Низкая корреляция значений межквартильного размаха высот (h) и лапласиана (L) отображена на диаграмме рассеяния (*puc. 3*) и объясняется принципиальным различием вычисленных показателей.



Рис. 3. Диаграмма рассеяния значений расчлененности рельефа на основе межквартильного размаха высот (h) и лапласиана (L) по GLD100

Корреляция между показателями степени расчлененности поверхности, полученными по данным LOLA и по данным GLD100, невелика за исключением двух случаев: расчлененность по LOLA на базе 1,8 км неплохо коррелирует с размахом лапласиана (L) и гессиана (H). Низкая корреляция расчлененности по данным LOLA с размахом высот (h) и уклонов (S) объясняется различием используемой меры расчлененности. На первый взгляд, кажется естественным ожидать более высокую корреляцию размаха лапласиана (L) на базе 0,47 км (данные GLD100) с размахом второй производной на базе 0,46 км (данные LOLA), а не на более длинной – 1,8 км. На самом деле, фактическое разрешение ЦМР GLD100 значительно ниже, чем размер пиксела в ее растровом представлении, и характерный горизонтальный размер расчлененности определяется не базой дифференцирования, а фактическим разрешением исходной ЦМР. При этом диаграмма рассеяния иллюстрирует некоторую зависимость этих показателей (*puc. 4*). Также на диаграмме заметен «выброс» в районе самых низких значений расчлененности, который иллюстрирует проявившиеся при дифференцировании артефакты в области лунных морей (*puc. 6*). Эти артефакты также снизили корреляцию двух параметров.



Рис. 4. Диаграмма рассеяния значений расчлененности рельефа при вычислении межквартильного размаха гессиана (H) по данным LOLA и GLD100

В *табл. 3* приведена неформальная оценка использованных мер расчлененности поверхности по каждому из критериев, перечисленных в разделе 1, по пятибалльной шкале от 1 (плохо) до 5 (отлично). Для сравнения приведены также оценки для межквартильного размаха второй производной профилей по данным орбитальных лазерных альтиметров на примере данных LOLA.

Критерий	Параметры расчлененности поверхности (GLD100): межквартильный размах				
	высот	уклонов	лапласиана	гессиана	
Адекватность	3	4	5	5	5
Симметрия, повороты	5	4	4	4	1
Симметрия, наклон	1	5	5	5	5
Типичность	1	4	5	5	5
Определенность масштаба	1	4	5	5	5
Устойчивость	5	5	5	5	5
Толерантность	5	2	1	1	5

Таблица 3. Оценка карт расчлененности поверхности по критериям

Как видно из *табл. 3*, вычисление расчлененности по данным лазерных альтиметров дает превосходные результаты по всем критериям, кроме симметрии по отношению к поворотам (изотропии). Все статистические характеристики рельефа, полученные на основе ЦМР GLD100, кроме размаха высот (h), получили по 4 балла по критерию «симметрия при повороте», что объясняется небольшой анизотропией, вносимой при попиксельном дифференцировании в квадратной сетке, несмотря на применение максимально симметричных фильтров. Но при этом карты, построенные на основе статистических параметров, вычисленных по фотограмметрической ЦМР GLD100, отличаются лучшей изотропией, чем карты,

построенные по данным альтиметра LOLA, которые характеризуют расчлененность поверхности в основном направлении вдоль меридионально-ориентированных орбит. Поэтому использование для вычисления статистических характеристик рельефа ЦМР, полученных фотограмметрическими методами, имеет некоторое преимущество даже в тех редких случаях, когда имеется достаточное обеспечение данными лазерной альтиметрии.

На *рис. 5* показано, как дифференцирование улучшает меру расчлененности по критерию типичности. На карте размаха высот (*рис. 5a*) видно большое количество светлых колец: все стенки больших кратеров характеризуются большим перепадом рельефа. При однократном (*рис. 5b*) и двукратном (*рис. 5c, 5d*) дифференцировании большинство светлых колец исчезает или бледнеет, типичная материковая поверхность получается более однородной. В то же время несколько наиболее молодых кратеров остаются яркими: их склоны и ближние выбросы действительно являются более расчлененными на километровых масштабах, чем типичная материковая поверхность. Поэтому меры расчлененности, включающие дифференцирование, получили более высокую оценку по критерию типичности (*табл. 3*).



Рис. 5. Изменение отображения типичности рельефа при использовании различных статистических характеристик: межквартильный размах а) высот (h); b) уклонов поверхности (S); c) лапласиана (L); d) гессиана (H). Показан типичный участок лунного материка; светлый тон изображения обозначает более высокую расчлененность рельефа

Вместе с тем при всех своих достоинствах межквартильные размахи лапласиана (L) и гессиана (H) имеют недостаток – низкую толерантность к погрешностям исходных данных, поскольку при вычислении второй производной рельефа проявляются артефакты, обусловленные технологией формирования ЦМР (*рис. 6c, 6d*). Светлые вертикальные и горизонтальные полосы совпадают с границами исходных изображений, использованных при построении ЦМР.



Рис. 6. Проявление артефактов ЦМР при использовании различных статистических характеристик: межквартильный размах а) высот (h); b) уклонов поверхности (S); с) лапласиана (L); d) гессиана (H). Показан участок Моря Дождей; светлый тон изображения обозначает более высокую расчлененность рельефа

Артефакты другого рода проявляются вследствие лакун в исходных данных, когда отсутствующая информация заполняется либо путем интерполяции результатов в соседних участках, либо привлечением других источников. Например, при формировании GLD100 лакуны этой ЦМР в высоких широтах от \pm 80–90°, образовавшиеся из-за обилия теней на изображениях LRO WAC при съемке в полярных регионах, заполнены данными LOLA, что на картах размаха лапласиана (L) и гессиана (H) проявилось характерным выделением круговых областей в приполярных областях выше \pm 80 параллелей (*puc. 9–10*). В связи с этим по критерию «толерантность» эти статистические характеристики имеют низкую оценку (1 балл). При однократном дифференцировании артефакты также проявляются, но в значительно меньшей степени (*puc. 8*).

Успех использования полученных карт во многом определяется удачным выбором их визуального представления. Результаты статистической обработки могут быть отображены в разных видах: в серой или цветной шкале, в виде изолиний и т.д. Выбор представления определяется целями дальнейшего использования карт. Например, для отождествления объектов, видимых на космических снимках поверхности планет, наиболее удобным оказывается применение серой шкалы, поскольку это позволяет лучше оценить форму объектов (*puc. 9 a, b*).







Puc. 8. Карта расчленённости рельефа Луны. Межквартильный размах значений уклонов (S)







Заключение

На основе глобальной ЦМР GLD100, полученной в результате фотограмметрической обработки космических изображений LRO WAC, вычислены несколько различных статистических характеристик рельефа поверхности Луны: межквартильный размах значений высот (h), уклонов (S), лапласиана (L), гессиана (H). С использованием предложенных критериев выполнена оценка каждого из полученных параметров с выявлением наиболее оптимального для характеристики меры расчлененности поверхности (шероховатости). В среде ГИС проведен статистический анализ полученных параметров и выявлена степень их корреляции со значениями расчленённости поверхности, вычисленных по данным LOLA. Результаты исследований представлены в виде глобальных электронных карт расчлененности поверхности Луны. Разработанная в данном исследовании методика расчета статистических параметров рельефа реализуется в среде ArcGIS.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ по теме «Разработка интегрированной технологии определения статистических характеристик рельефа планет и спутников Солнечной системы на основе ЦМР, полученных фотограмметрическими методами», Договор № 14.В37.21.1204.

Литература

- 1. *Бугаевский Л.М.* Математическая картография: Учебник для вузов. М.: 1998. 400 с.: ил. 65.
- 2. Карачевцева И.П., Конопихин А.А., Шингарева К.Б., Черепанова Е.В., Гусакова Е.Н., Баскакова М.А. Атлас Лунохода-1: геоинформационное картографирование и анализ региона посадки АМС «Луна-17» по данным дистанционного зондирования спутника Lunar Reconnaissance Orbiter // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 292–303.
- 3. *Aharonson O., Zuber M.T., Neumann G.A., Head J.W.* Mars: Northern hemisphere slopes and slope distributions // Geophysical Research Letters. 1998. No. 25. P. 4413–4416.
- Aharonson O., Zuber M.T., Rothman D.H. Statistics of Mars' topography from the Mars Orbiter Laser Altimeter: Slopes, correlations, and physical models // Journal of Geophysical Research. 2001. No. 106. P. 23723–23736.
- 5. *Malamud B.D., Turcotte D.L.* Wavelet Analysis of Mars MOLA Topography // Lunar and Planetary Science. 31. 2000. abstract #1016.
- 6. *Kreslavsky M.A., Head J.W.* Kilometer-scale roughness of Mars: Results from MOLA data analysis // J. Geophys. Res. 2000. 105. 26695–26712.
- Kreslavsky M.A., Head J.W. North-south topographic slope asymmetry on Mars: Evidence for insolation-related erosion at high obliquity // Geophysical Research Letters, 2003. #30, CiteID 1815, DOI 10.1029/2003GL017795.
- 8. *Kreslavsky M. A.* New observational evidence of strong seismic effects of basin-forming impacts on the Moon // European Planetary Science Congress 2010, Abstract # EPSC2010-357.

- Kreslavsky M.A., Head J.W. New observational evidence of strong seismic effects of basinforming impacts on the Moon from Lunar Reconnaissance Orbiter Lunar Orbiter Laser Altimeter data // J. Geophys. Res. 2012. No. 117, doi: 10.1029/2011JE003975.
- Kreslavsky M.A., Head J.W., Neumann G.A., Rosenburg M.A., Aharonson O., Smith D.E., Zuber M.T. Lunar topographic roughness maps from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data: Scale dependence and correlation with geologic features and units // Icarus. 2013. V. 226. Issue 1. P. 52–66.
- 11. Robinson M.S., 22 colleagues. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview // Space Sci. Rev. 2010. 150. 81–124.
- Rosenburg M.A., Aharonson O., Head J.W., Kreslavsky M.A., Mazarico E., Neumann G.A., Smith D.E., Torrence M.H., Zuber M.T. Global surface slopes and roughness of the Moon from the Lunar Orbiter Laser Altimeter. // J. Geophys. Res. 2011. No. 116. P. 2001.
- Smith D.E., Zuber M.T., Solomon S.C., Phillips R.J., Head J.W., Garvin J.B., Banerdt W.B., Muhleman D.O. et al. The global topography of mars and implications for surface evolution // Science. 1999. No. 284. P. 1495.
- 14. *Smith D.E., 30 colleagues.* The Lunar Orbiter Laser Altimeter investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission.// Space Sci. Rev. 2010. No. 150. P. 209–241.
- Scholten F., Oberst J., Matz K.-D, Roatsch T., Wählisch M., Speyerer E.J., Robinson M.S. GLD100: The near-global lunar 100 m raster DTM from LROC WAC stereo image data // J. Geophys. Res. 2012. No. 117. E00H17.

Mapping of the statistical characteristics of the lunar relief on the basis of the global digital elevation model GLD-100

A.A. Kokhanov¹, M.A. Kreslavskiy^{1,2}, I.P. Karachevtseva¹, E.N. Matveev¹

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia E-mail: s_kokhanov@mexlab.ru, i_karachevtseva@mexlab.ru ²University of California - Santa Cruz, Santa Cruz, USA E-mail: mkreslav@.ucsc.edu

This paper presents the methods and results of calculations of topographic roughness of the Moon on the basis of a global digital elevation model derived on the basis of the photogrammetric processing of satellite images Lunar Reconnaissance Orbiter. Here are described in detail the criteria for evaluation of the statistical characteristics. Also here is described the work on the calculation of the statistical parameters of the lunar relief according to a digital elevation model (DEM GLD 100). Results of the comparative analysis of the values obtained by different methods are shown. As results of mapping global maps of topographic roughness of the Moon are presented.

Keywords: Moon, DEM GLD100, LRO WAC, topographic roughness, statistical characteristics of the relief, planetary cartography, GIS.