

УДК 52.17:520.876

И. А. ДУЛОВА, Ю. В. КОРНИЕНКО, С. И. СКУРАТОВСКИЙ

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина
E-mail: ss_snake@ukr.net**СОВМЕЩЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ФОТОКЛИНОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Рассматриваются возможности совмещения изображений поверхности планеты в контексте определения ее рельефа. Предполагается, что изображения получены при различных условиях наблюдения. Предложен новый алгоритм совмещения по промежуточно реконструированным рельефам. С помощью компьютерного моделирования продемонстрирована его эффективность при большой разнице углов освещения.

Ключевые слова: определение рельефа поверхности, фотометрический метод, совмещение изображений, разница углов освещения

Фотометрический (фотоклинометрический) метод определения рельефа участка поверхности планеты по ее оптическим или радиоярким изображениям является одним из самых перспективных и многообещающих в этой области. В простейшем варианте он был предложен ван Диггеленом [1] еще в 1951 г. Впоследствии был усовершенствован в [2] и обобщен в [3]. Различные варианты фотометрического метода широко используются исследователями планет Солнечной системы [4–8] и, видимо, он будет актуален еще долгое время. К его преимуществам следует отнести возможность получения необходимых изображений за один пролет космического аппарата над исследуемым участком поверхности, а также то, что разрешение получаемых топографических данных ограничивается только разрешением исходных изображений. Погрешности усовершенствованного метода исследованы в [9]. Существенным является также то, что в обобщенном виде [3] он может применяться как при недостатке информации, так и при ее избытке [10]. В последнем случае, однако, возникают сопутствующие проблемы, одной из которых является привязка изображений к единым координатам, т. е. их совмещение и, возможно, поворот. Подобные проблемы часто возникают в связи с задачей получения топографической информации о поверхности [11–13], в особенности при использовании для этого стереометрии [14], когда точное совмещение является решающим фактором. В рамках настоящей работы будем считать, что поворот изображений уже устранен, и остано-

вима на вопросе их совмещения. Задача эта не является тривиальной, поскольку условия наблюдения изображений зачастую отличаются, иногда весьма существенно. Однако, как будет показано ниже, существует возможность определения вектора сдвига как одного из неизвестных параметров в процессе реконструкции рельефа.

1. Развитие фотометрического метода реконструкции рельефа поверхности

В первоначальном варианте фотометрического метода [1] рельеф $H(x, y)$ предлагалось получать путем решения уравнения

$$\nabla H(x, y) = \mathbf{n}(x, y), \quad (1)$$

где $\mathbf{n}(x, y)$ – поле наклонов поверхности, которое можно найти из результатов наблюдения. В частности, была показана принципиальная возможность исследовать рельеф Луны, наблюдая ее с Земли.

Однако такой прямолинейный подход к задаче может дать искомый рельеф только в случае, если погрешность измерения равна нулю. В остальных случаях найденная экспериментально правая часть с вероятностью 1 содержит отличную от нуля вихревую случайную погрешность, и тогда равенство (1) не может быть выполнено ни при каком $H(x, y)$. В прикладной математике такие задачи называют некорректными. Следовательно, требуется изменить постановку задачи.

В работе [2] была предложена постановка задачи, основанная на Байесовском статистическом подходе: зная статистические свойства по-

© И. А. Дулова, Ю. В. Корниенко, С. И. Скуратовский, 2015

грешности, найти рельеф, имеющий наибольшую апостериорную плотность вероятности при данном $\mathbf{n}(x, y)$. В работе [2] погрешность считалась белым шумом и задача свелась к минимизации квадратичного функционала, а ее решением оказался рельеф, удовлетворяющий уравнению Пуассона

$$\Delta H(x, y) = \operatorname{div} \mathbf{n}(x, y)$$

с граничным условием Коши или Неймана на границе исследуемого района.

Описанный метод требует знания фотометрических свойств исследуемой поверхности. Они не всегда известны заранее и могут изменяться от точки к точке. Задача оптимальной статистической оценки одновременно рельефа и фотометрических параметров при достаточном наборе исходных изображений была поставлена и решена в [3]. Учитывалось также то обстоятельство, что исходные изображения могут быть не привязаны к общей системе координат, и для определения рельефа их требуется совместить. Как уже говорилось выше, задача эта не является тривиальной, поэтому строгий подход к ней требует включить векторы сдвига исходных изображений в число величин, подлежащих статистическому оцениванию совместно с рельефом и фотометрическими параметрами.

2. Определение вектора сдвига совместно с реконструкцией рельефа поверхности

В работе [3] для определения неизвестного рельефа, фотометрических параметров поверхности и векторов сдвига используется логарифм апостериорной плотности вероятности (логарифмическая функция правдоподобия). В частном случае, когда фотометрические параметры считаются постоянными по району наблюдения и известными, она принимает следующий вид [15]:

$$L(H, \mathbf{t}) = \int \tilde{H}^*(\mathbf{k}) \alpha(\mathbf{k}) \tilde{H}(\mathbf{k}) dS_{\mathbf{k}} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \mathbf{t}_j \gamma_{ij} \mathbf{t}_i + \\ + \sum_{j=1}^m \int [\tilde{J}_j^*(\mathbf{k}) \beta(\mathbf{k}) J_j(\mathbf{k}) - \\ - \tilde{H}^*(\mathbf{k}) (-i) \mathbf{k} c_j \tilde{g}_j^*(\mathbf{k}) e^{-i \mathbf{k} \mathbf{t}_j} \beta(\mathbf{k}) J_j(\mathbf{k}) -$$

$$- \tilde{J}_j^*(\mathbf{k}) \beta(\mathbf{k}) e^{i \mathbf{k} \mathbf{t}_j} \tilde{g}_j(\mathbf{k}) i \mathbf{k} c_j \tilde{H}(\mathbf{k}) + \\ + \tilde{H}^*(\mathbf{k}) (\mathbf{k} c_j)^2 \tilde{g}_j^*(\mathbf{k}) \beta(\mathbf{k}) \tilde{g}_j(\mathbf{k}) \tilde{H}(\mathbf{k})] dS_{\mathbf{k}},$$

где $J_j(x, y)$ – j -е изображение; $g_j(x, y)$ – ядро, описывающее замытие; \mathbf{t}_j – вектор сдвига j -го изображения; \mathbf{k} – вектор пространственной частоты; $\alpha(\mathbf{k})$ – величина, обратная дисперсии сигнала; $\beta(\mathbf{k})$ – величина, обратная дисперсии шума; γ – матрица, обратная матрице автоковариации для вектора \mathbf{t} , размером $m \times m$ клеток γ_{ij} по 2×2 элементов каждая; \mathbf{c}_j – двумерная векторная константа, определяемая свойствами поверхности и геометрией эксперимента; надстрочная тильда обозначает фурье-образ, а звездочка – комплексное сопряжение.

Приравняв к нулю производную от этого выражения по $\tilde{H}(\mathbf{k})$, получим выражение для оптимального фильтра, позволяющего восстановить наиболее вероятный рельеф по серии из m изображений с учетом известных векторов сдвига \mathbf{t}_j :

$$\tilde{H}(\mathbf{k}) = \left[\alpha(\mathbf{k}) + \sum_{j=1}^m (\mathbf{k} c_j)^2 \tilde{g}_j^*(\mathbf{k}) g_j(\mathbf{k}) \beta(\mathbf{k}) \right]^{-1} \times \\ \times \sum_{j=1}^m (-i) \mathbf{k} c_j \tilde{g}_j^*(\mathbf{k}) e^{-i \mathbf{k} \mathbf{t}_j} \beta(\mathbf{k}) \tilde{J}_j(\mathbf{k}). \quad (2)$$

Для совместного определения векторов сдвига и рельефа необходимо также взять производную по \mathbf{t} от логарифмической функции правдоподобия и приравнять ее к нулю:

$$\sum_{i=1}^m \gamma_{ij} \mathbf{t}_i + \int \left[\tilde{J}_j^*(\mathbf{k}) \beta(\mathbf{k}) i \mathbf{k} e^{i \mathbf{k} \mathbf{t}_j} \tilde{g}_j(\mathbf{k}) (-i) \mathbf{k} c_j \tilde{H}(\mathbf{k}) + \right. \\ \left. + \tilde{H}^*(\mathbf{k}) i \mathbf{k} c_j \tilde{g}_j^*(\mathbf{k}) (-i) \mathbf{k} e^{-i \mathbf{k} \mathbf{t}_j} \beta(\mathbf{k}) \tilde{J}_j(\mathbf{k}) \right] dS_{\mathbf{k}} = 0.$$

После преобразований получим

$$\sum_{i=1}^m \gamma_{ij} \mathbf{t}_i - 2 \operatorname{Im} \int \tilde{J}_j^*(\mathbf{k}) \beta(\mathbf{k}) \mathbf{k} e^{i \mathbf{k} \mathbf{t}_j} \tilde{g}_j(\mathbf{k}) i \mathbf{k} c_j \times \\ \times \tilde{H}(\mathbf{k}) dS_{\mathbf{k}} = 0. \quad (3)$$

Подставив (2) в (3), исключим рельеф и получим уравнение для \mathbf{t} :

$$\sum_{i=1}^m \gamma_{ij} \mathbf{t}_i = 2 \operatorname{Im} \int \tilde{J}_j^*(\mathbf{k}) \beta(\mathbf{k}) \mathbf{k} e^{i \mathbf{k} \mathbf{t}_j} \tilde{g}_j(\mathbf{k}) i \mathbf{k} c_j \times$$

$$\times \left[\alpha(\mathbf{k}) + \sum_{j=1}^m (\mathbf{k}\mathbf{c}_j)^2 \tilde{g}_j^*(\mathbf{k})\beta(\mathbf{k})g_j(\mathbf{k}) \right]^{-1} \times \\ \times \sum_{j=1}^m (-i)\mathbf{k}\mathbf{c}_j \tilde{g}_j^*(\mathbf{k})e^{-i\mathbf{k}\mathbf{t}_j}\beta(\mathbf{k})\tilde{J}_j(\mathbf{k})dS_{\mathbf{k}}.$$

Это уравнение представляет собой систему $2m$ скалярных уравнений с $2m$ скалярными неизвестными $t_{1x}, t_{1y}, \dots, t_{mx}, t_{my}$. Ее можно решить методом Ньютона или другим подходящим методом. После нахождения вектора \mathbf{t} он используется в (2) для реконструкции рельефа.

Таким образом, строгое решение задачи приводит к итерационному алгоритму, громоздкому при программировании и вычислениях. По-видимому, из-за этого исследователи в большей своей части использовали на практике метод ван Диггелена или его вариации [16–18]. Возникает необходимость поиска менее трудоемких методов решения задачи.

3. Предварительное совмещение изображений

С точки зрения упрощения практической реализации целесообразно разделить нахождение вектора сдвига от определения рельефа и рассмотреть предварительное (по отношению к определению рельефа) совмещение изображений. Как уже говорилось, задача совмещения нескольких изображений в общем случае не является тривиальной из-за различий в условиях их получения. Наиболее существенную роль играют различия в углах освещения и наблюдения. Что касается угла наблюдения, то его влияние на вид изображения определяется законом рассеяния поверхности. При совместном определении векторов сдвига и рельефа он учитывается в константе \mathbf{c}_j . Мы в большинстве случаев будем считать, что поверхность рассеивает по закону Ламберта, т. е. равномерно во все стороны, поэтому от азимутального положения наблюдателя изображение не зависит. При этом яркость элемента поверхности определяется углом между вектором освещения и вектором нормали к поверхности в данной точке. Коэффициентом отражения можно пренебречь, поскольку влияние его на все изображения одинаково. Следовательно, основным фактором, влияющим на точ-

ность простого совмещения изображений, будет разница в углах освещения.

Зависимость точности простого совмещения изображений от разницы A углов освещения была исследована с помощью компьютерного эксперимента. Под простым совмещением будем понимать последовательное смещение от начальной точки в сторону убывания среднеквадратичного отклонения изображений до ближайшего минимума, вектор сдвига в котором и считается искомым вектором сдвига одного изображения относительно другого [19]. Для того чтобы уменьшить влияние особенностей рельефа поверхности на точность совмещения изображений, эксперимент был проведен для четырех участков, моделирующих поверхность лунного типа с различными характеристиками. Начальный вектор сдвига второго изображения относительно первого составлял $(-10, -5)$ (в элементах разрешения). Результат оказался неожиданно хорошим – при $A < 70^\circ$ в отсутствие шума регистрации изображения совмещаются точно (табл. 1) вне зависимости от характера поверхности, однако при дальнейшем увеличении A вплоть до 180° (встречное освещение, временами встречается при наблюдениях) найденный вектор сдвига приобретает случайный характер. С другой стороны, точность реконструкции рельефа возрастает с увеличением A вплоть до 90° и снова убывает при дальнейшем его увеличении до 180° [20]. Таким образом, в наиболее ценных с практической точки зрения случаях простое совмещение изображений не дает приемлемых результатов. Ниже предлагается иной метод совмещения, не чувствительный к разнице углов освещения изображений A .

В работе [10] был рассмотрен статистический подход к определению рельефа в условиях недостаточной информации, в частности при обработке единственного снимка. Этот подход был применен при восстановлении рельефа участков поверхности Марса по одиночным изображениям [21]. Обработка выполнялась с помощью фильтра (2) при $m = 1$. Вектор сдвига при обработке единственного изображения не учитывался. Рельеф, восстановленный по одному изображению, содержит погрешности, связанные с отсутствием информации о компоненте наклона, перпендикулярной направлению освещения.

Таблица 1. Результаты совмещения пар изображений в зависимости от разницы их углов освещения при отсутствии шума регистрации

Разница углов, градус	Сюжет с центральным кратером		Сюжет со старым кратером		Сюжет без особенностей		Холмистая поверхность	
	x	y	x	y	x	y	x	y
0	-10	-5	-10	-5	-10	-5	-10	-5
10	-10	-5	-10	-5	-10	-5	-10	-5
20	-10	-5	-10	-5	-10	-5	-10	-5
30	-10	-5	-10	-5	-10	-5	-10	-5
40	-10	-5	-10	-5	-10	-5	-10	-5
50	-10	-5	-10	-5	-10	-5	-10	-5
60	-10	-5	-10	-5	-10	-5	-10	-5
70	-8	-8	-9	-4	-9	-4	-8	-4
80	-8	-8	-12	-7	-11	-6	-14	-8
90	-8	-8	-13	-8	-13	-8	-15	-10
100	-8	-8	-18	-15	-22	-19	-36	-30
110	-33	-38	-18	-17	-29	-34	-34	-32
120	-32	-41	-17	-18	-28	-36	-32	-35
130	-11	-10	-17	-19	-26	-38	-26	-42
140	-	-	-16	-20	-39	-62	-24	-59
150	-24	-55	-14	-21	-23	-58	-22	-60
160	-10	-51	-13	-21	-22	-58	-21	-61
170	-10	-53	-11	-23	-22	-58	-1	-64
180	-9	-52	-9	-23	-21	-59	0	-64

Однако при реконструкции рельефа таким способом недостаток наблюдательных данных возмещается априорной информацией. Поэтому восстановленный рельеф зависит от направления освещения в гораздо меньшей степени, чем изображение [15]. Это открывает путь к следующему алгоритму:

- 1) по каждому исходному изображению в отдельности определяется рельеф;
- 2) полученные карты рельефа совмещаются с помощью простого алгоритма [19];
- 3) найденные векторы сдвига используются при восстановлении рельефа (можно либо предварительно сдвинуть изображения, либо воспользоваться фильтром (2), который учитывает сдвиги).

В основе данного алгоритма также лежит использование статистического подхода к обработке изображений, но, в отличие от предыдущего, он может быть назван лишь субоптимальным, поскольку не имеет строгого математического обоснования. Однако он достаточно эффективен, о чем свидетельствует компьютерный эксперимент.

Для проверки алгоритма был использован случайный рельеф, типичный для горных районов лунной поверхности (рис. 1, *a*). Затем были смоделированы изображения этого района, полученные при разных значениях азимута источника света, с разрешением 1024×512 (рис. 1, *b-e*). Эти изображения были сдвинуты на разные значения вектора сдвига \mathbf{t} , которые приведены в верхней строке табл. 2. В изображения был внесен также аддитивный шум. Результаты совмещения с помощью описанного алгоритма при различном отношении сигнал/шум (ОСШ) приведены в табл. 2. Хорошо видно, что такое совмещение прекрасно работает при любой разнице углов освещения. Ошибки возникают лишь с уменьшением ОСШ до 1, когда уровень шума приближается к уровню сигнала.

4. Заключение

Подводя итоги исследования возможностей совмещения изображений, полученных при различных условиях съемки, при достаточно больших отношениях сигнал/шум (порядка десятков) мож-

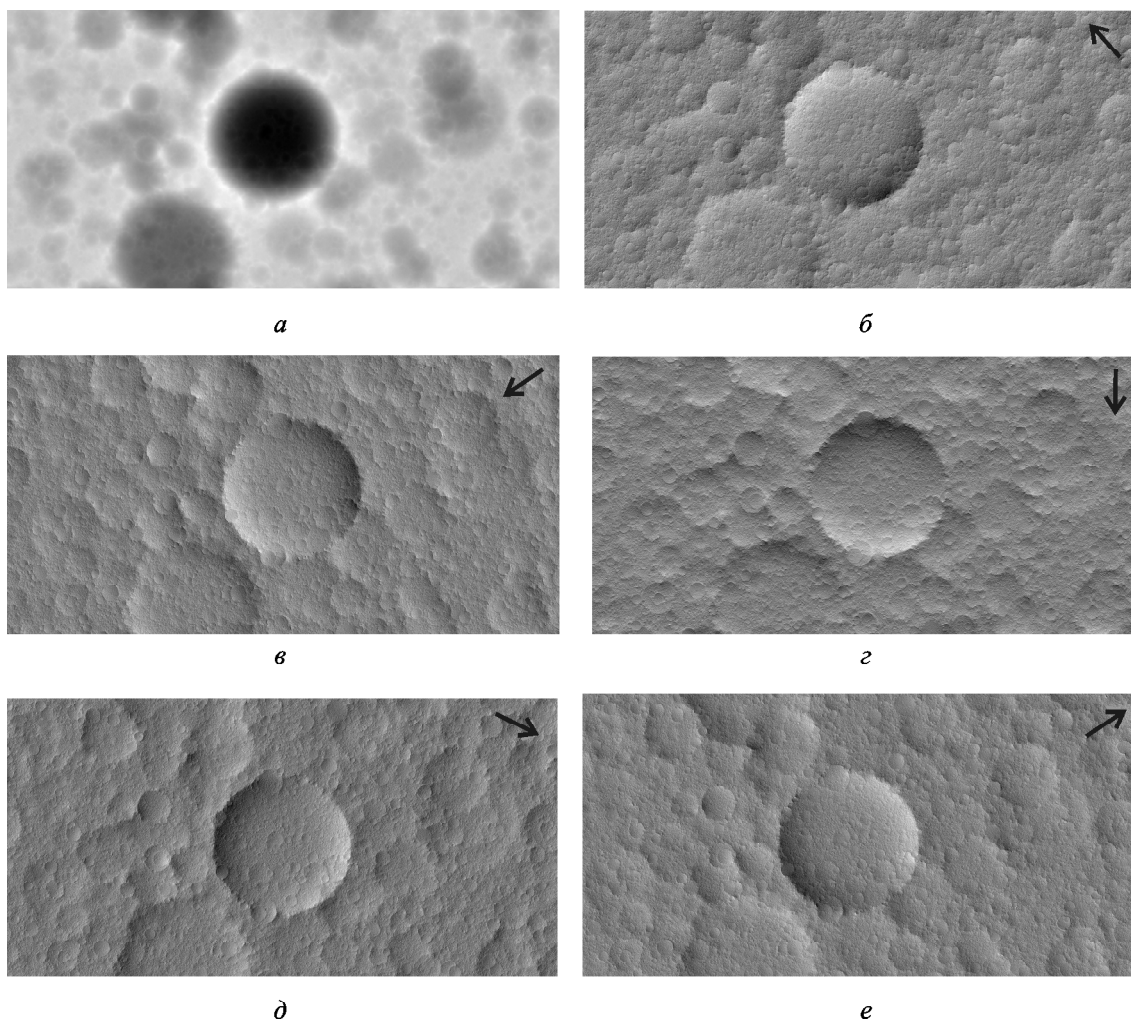


Рис. 1. Карта участка поверхности (яркость указывает высоту) (а) и серия из пяти его изображений с различными направлениями освещения, сдвинутых друг относительно друга: азимут освещения -140° , сдвиг отсутствует (б); азимут освещения -60° , сдвиг на вектор (14, 35) (в); азимут освещения 0° , сдвиг на вектор (9, 39) (г); азимут освещения 70° , сдвиг на вектор (39, 19) (д); азимут освещения -120° , сдвиг на вектор (38, -6) (е)

Таблица 2. Результаты совмещения по восстановленным рельефам при различных отношениях сигнал/шум

	Изображение 1		Изображение 2		Изображение 3		Изображение 4		Изображение 5	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
Истинный сдвиг	0	0	14	35	9	39	39	19	38	-6
Нет шума	0	0	14	35	9	39	39	19	38	-6
ОСШ = 100	0	0	14	35	9	39	39	19	38	-6
ОСШ = 50	0	0	14	35	9	39	38	19	38	-6
ОСШ = 10	0	0	14	35	9	39	39	19	38	-6
ОСШ = 5	0	0	14	35	9	39	29	19	38	-6
ОСШ = 1	0	0	15	35	9	39	2	5	38	-6

но с уверенностью рекомендовать предлагаемое совмещение по восстановленным рельефам как наиболее эффективное, универсальное и простое

решение поставленной задачи. При небольшой разнице углов освещения на изображениях можно применять также простое совмещение как еще

более быстрое. Однако при этом следует иметь в виду ограничение по разности углов освещения (табл. 1).

Следует также отметить существенное влияние на совмещение еще одной особенности изображений, не рассмотренной ранее, – параллакса. Элементы поверхности на изображениях оказываются искаженными тем сильнее, чем больше вектор наблюдения отклоняется от средней нормали к поверхности. Учет параллакса – это предмет отдельного исследования. Во всех проведенных экспериментах считалось, что наклоны на поверхности невелики, а угол наблюдения близок к средней нормали, и, следовательно, влиянием параллакса можно пренебречь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Van Diggelen J.* A photometric investigation of the slopes and heights of the ranges of hills in the maria of the Moon // *Netherlands Astron. Inst. Bull.* – 1951. – Vol. 11. – P. 283–289.
2. *Парусимов В. Г., Корниенко Ю. В.* Об отыскании наиболее вероятного рельефа поверхности планеты по ее оптическому изображению // *Астрометрия и астрофизика.* – 1973. – Вып. 19. – С. 20–24.
3. *Корниенко Ю. В., Дулова И. А., Нгуен Суан Ань.* Винеровский подход к определению оптических характеристик поверхности планеты по результатам фотометрических наблюдений // *Кинематика и физика небесных тел.* – 1994. – Т. 10, № 5. – С. 69–76.
4. *Howard A. D., Blasius K. R., and Cutts J. A.* Photoclinometric determination of the topography of the Martian north polar cap // *Icarus.* – 1982. – Vol. 50, Is. 2–3. – P. 245–258.
5. *Wildey R. L.* Radarclinometry of the Earth and Venus from Space-Shuttle and Venera-15 imagery // *Earth Moon Planets.* – 1990. – Vol. 48, Is. 3. – P. 197–231.
6. *Watters T. R. and Robinson M. S.* Radar and photogrammetric studies of wrinkle ridges on Mars // *J. Geophys. Res. Planets.* – 1997. – Vol. 102, No. E5. – P. 10889–10903.
7. *Beyer R. A., McEwen A. S., and Kirk R. L.* Meter-scale slopes of candidate MER landing sites from point photogrammetry // *J. Geophys. Res. Planets.* – 2003. – Vol. 108, No. E12. – doi: 10.1029/2003JE002120.
8. *Fenton L. K. and Herkenhoff K. E.* Topography and stratigraphy of the northern martian polar layered deposits using photogrammetry, stereogrammetry, and MOLA altimetry // *Icarus.* – 2000. – Vol. 147, Is. 2. – P. 433–443.
9. *Дулова И. А., Корниенко Ю. В.* Случайная погрешность определения рельефа поверхности по ее радиояркости // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2001. – Т. 6, № 4. – С. 310–316.
10. *Дулова И. А., Корниенко Ю. В., Скуратовский С. И.* Определение рельефа поверхности клинометрическим методом при избытке или недостатке исходных данных // *Радиофизика и электроника.* – Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2007. – Т. 12, № 2. – С. 408–415.
11. *Opanasenko A. N., Shkuratov Y. G., and Opanasenko N. V.* Topography of three localities on the Moon from combined Clementine and Hubble space telescope images // *Lunar and Planet. Sci. Conf. 38-th. LPI.* – Houston (USA). – 2007. – Abstract #1564.
12. *Korokhin V. V., Velikodsky Yu. I., Shkuratov Yu. G., Kaydash V. G., Gerasimenko S. Y., Opanasenko N. V., Videen G., and Pieters C.* Removal of topographic effects from lunar images using Kaguya (LALT) and earth-based observations // *Planet. Space Sci.* – 2010. – Vol. 58, Is. 10. – P. 1298–1306.
13. *Korokhin V. V., Velikodsky Yu. I., Shalygin E. V., Shkuratov Yu. G., Kaydash V. G., and Videen G.* Retrieving lunar topography from multispectral LROC images // *Planet. Space Sci.* – 2014. – Vol. 92. – P. 65–76.
14. *Scholten F., Oberst J., Matz K.-D., Roatsch T., Wählisch M., Speyerer E. J., and Robinson M. S.* GLD100: The near-global lunar 100 m raster DTM from LROC WAC stereo image data // *J. Geophys. Res. Planets.* – 2012. – Vol. 117, Is. E12. – doi:10.1029/2011JE003926.
15. *Корниенко Ю. В., Дулова И. А., Копилович Л. Е., Пугач В. В., Масалов Д. С., Скуратовский С. И., Бондаренко Н. В., Каныгин С. А., Стулова Л. В., Ильинский А. В., Бабичев А. А., Бронников А. С.* Развитие оптических и радиофизических методов исследования космических объектов // *Развитие квазиоптических и оптических методов в радиофизических исследованиях: отчет по НИР “ОПОРА” в 3 кн.* – ИРЭ НАН Украины; рук. Дзюбенко М. И.; исполн.: Ю. В. Корниенко и др. – 2006. – 324 с. – № ГР 01.03U002263.
16. *Wildey R. L.* Radarclinometry // *Earth Moon Planets.* – 1986. – Vol. 36, Is. 3. – P. 217–247.
17. *Kirk R. L., Barrett J. M., and Soderblom L. A.* Photogrammetry made simple...? [electronic source] // *Advances in planetary mapping 2003.* – Houston (USA) – 2003. – Available from http://www.flag.wr.usgs.gov/USGSFlag/Space/Isprs/MEETINGS/Houston2003/abstracts/Kirk_isprs_mar03.pdf.
18. *Lohse V., Heipke C., and Kirk R. L.* Derivation of planetary topography using multi-image shape-from-shading // *Planet. Space Sci.* – 2006. – Vol. 54, Is. 7. – P. 661–674.
19. *Корниенко Ю. В.* Радиовидение и цифровая обработка изображений. В кн.: *Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн* / Под ред. А. Я. Усикова. – Киев: Наукова думка, 1986. – С. 294–338.
20. *Skuratovsky S. I., Dulova I. A., Kornienko Yu. V., and Bondarenko N. V.* Optimal observational conditions of the planetary surface for the relief reconstruction with photometric method // *The 42th Vernadsky – Brown Microsymposium on Comparative Planetology.* – Moscow (Russia). – 2005. – No. M42_61.
21. *Дулова И. А., Скуратовский С. И., Бондаренко Н. В., Корниенко Ю. В.* Восстановление рельефа поверхности по одиночным изображениям с помощью фотометрического метода // *Астрономический вестник.* – 2008. – Т. 42, № 6. – С. 557–571.

I. O. Dulova, Yu. V. Kornienko, S. I. Skuratovskiy

Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України,
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

СУМІЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ
РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ
ФОТОКЛІНОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

Розглядаються можливості суміщення зображень поверхні планети в контексті визначення її рельєфу. Вважається, що зображення отримані за різних умов спостереження. Запропоновано новий алгоритм суміщення за проміжно реконструйованими рельєфами. За допомогою комп'ютерного моделювання продемонстровано його ефективність для великої різниці кутів освітлення.

I. A. Dulova, Yu. V. Kornienko, and S. I. Skuratovskiy

O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
12, Akad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

IMAGES MATCHING IN CASE OF SURFACE
RELIEF RECONSTRUCTION WITH THE
PHOTOCINOMETRIC METHOD

The possibilities of planetary surface images matching in case of reconstruction of this surface relief are discussed. The images were assumed to be obtained under different observation conditions. The new matching algorithm using intermediate-reconstructed reliefs is proposed. Its efficiency under great difference of illumination angles is shown with the computer experiment.

Статья поступила в редакцию 05.11.2014