

## **Эффективное пространственное разрешение данных и инструмента. На примере мультимасштабного анализа ЦМР**

**А.А. Златопольский**

*Институт космических исследований РАН, Москва 117997, Россия*

*E-mail: aazlat@gmail.com*

Работа посвящена анализу реального разрешения как самих данных дистанционного зондирования, так и инструментов их анализа. Вводится понятие эффективного разрешения. Эффективное разрешение данных характеризует размер самых мелких объектов (деталей), которые присутствуют в этих данных. Эффективное разрешение инструмента характеризует размер самых мелких объектов (деталей), которые способны обнаружить выбранный инструмент анализа данных. Дан пример практического определения этих характеристик и их использования. Показано, как соотносить эти величины между собой и как извлекать самые мелкие детали, которые не обрабатываются используемым инструментом. Приведены примеры применения этих параметров при мультимасштабном исследовании ориентационных статистических характеристик элементов рельефа. В этом исследовании измеряется и сравнивается среднее направление элементов рельефа разного масштаба (размера). Иногда при небольшом изменении масштаба направление меняется существенно, скачком. Нас, в первую очередь, интересуют «особые масштабы», при переходе к которым направление рельефа изменяется скачком гораздо чаще, чем при переходе к другим масштабам. В работе использованы цифровые модели рельефа Земли (SRTM) и Луны (GLD-100). В качестве инструмента анализа данных использовалась технология LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis).

**Ключевые слова:** разрешение данных, цифровая модель рельефа, мультимасштабный анализ, особые масштабы.

### **Введение**

При исследовании дистанционных данных необходимо понимать, с объектами какого масштаба (размера) мы реально работаем. Особенно важно обратить на это внимание при статистических измерениях, когда мы не отслеживаем единичные объекты.

С этой точки зрения – какие объекты практически выявляются и измеряются – проанализируем технологические особенности, как самих данных, так и инструментов их анализа. Рассмотрим, какие именно объекты присутствуют («видны») в используемых данных, и какие объекты доступны («видны») используемому инструменту. Параметры, которые это оценивают, будем называть соответственно эффективным разрешением данных и эффективным разрешением инструмента. Оба эффективных параметра зависят от конкретной задачи - что именно мы ищем, что для нас важно, что для нас объект, что не нужная деталь, а что шум.

В статье приводится пример оценки и использования этих параметров при исследовании мультимасштабных свойств рельефа (Златопольский, 2013). В этом исследовании по цифровой модели рельефа (ЦМР) выявляются хребты и долины определенного размера (масштаба), измеряется их направление в каждой точке, а затем и их среднее направление в большом окне. Изучается, как это среднее направление зависит от того, объекты какого масштаб анализируются

## Эффективное разрешение инструмента

Для поиска долин и хребтов в этой работе использована цифровая модель рельефа SRTM с разрешением 0,06511 км/пикс. Если существенно сжать эти данные (скажем, в 8 раз до разрешения  $E = 0,521$  км/пикс), то можно быть абсолютно уверенным, что полученное разрешение  $E$  соответствует реальности, а не снижено какими-то особенностями процесса формирования данных, и значит, возможно расположение хребта и долины буквально в соседних пикселях. Для поиска хребтов и долин, для измерения их направления используется инструмент LESSA (Златопольский, 2011), который при поиске этих объектов работает не с отдельными пикселями, а с небольшой окрестностью растра. Поэтому объекты (детали), которые гораздо меньше этой окрестности (10 пикс) не проявляются, то есть мы фактически работаем с более грубыми данными, с данными другого - «эффективного» - разрешения,  $E_i > E$ , которое определяется нашим инструментом. Для того, чтобы практически оценить эффективное разрешение - какие мелкие объекты еще проявляются, а какие мы уже «не видим» - проведем следующий эксперимент.

Используем ЦМР участка Забайкалья (район Шилки, 48...56 с.ш. 111...123 в.д.) сжатые до  $E = 0,521$  км/пикс. Далее сгладим эту ЦМР - сжатие в  $K$  раз и растяжение в  $K$  раз - стирая мелкие детали. Будем производить эту операцию с растущим  $K$ , наблюдая, как изменяются (или не изменяются) результаты поиска хребтов - долин и результаты измерения их среднего направления. Распределение среднего направления по всей территории отображается на рисунке «линиями вытянутости», которые показывают, куда в среднем вытянуты объекты той или иной части территории.

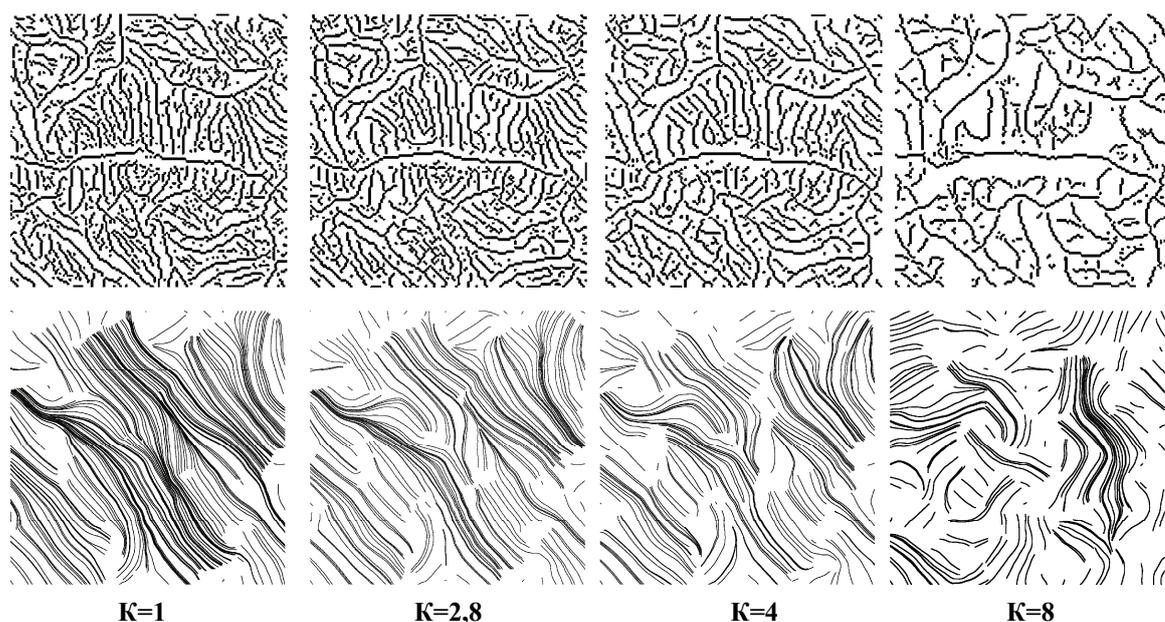


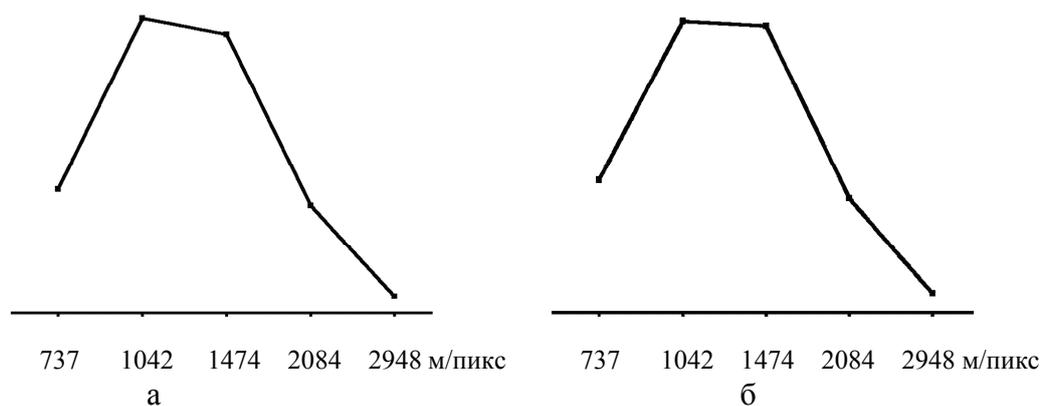
Рис. 1. Пример выявления хребтов и долин (фрагмент) и измерения их ориентации при разной степени сглаживания исходных данных ( $K=1$  – не сглажено)

Повторяем этот процесс – сглаживание, поиск объектов и измерение их направления, постепенно увеличивая  $K$ . Ищем максимальную величину  $K$ , при которой сглаживание еще практически не сказывается как на результате поиска хребтов и долин (характерный фрагмент территории,  $300 \times 300$  пикс), так и на их линиях вытянутости (по всей территории), *рис. 1*.

Видим, что при  $K < 4$  найденные хребты и долины почти не изменяются, а при  $K=4$  изменения уже есть, но они малы. Ту же ситуацию мы видим и по линиям вытянутости. А значит самые мелкие обнаруживаемые объекты примерно в  $C_i=3$  раза больше, чем те, что могут быть видны при исходном разрешении ( $E$ ). И эффективное разрешение представленного инструмента можно оценить, как  $E_i=E \cdot C_i$ . Таким образом, мы оценили, объекты какого размера реально учитываются в нашем измерении.

Эффективное разрешение инструмента  $E_i$  показывает также и то, что данные с грубым разрешением  $E_i$  можно растянуть до разрешения  $E$  и получить этим инструментом практически тот же результат, что и при работе с данными реального разрешения  $E$ . Это подсказывает очень полезную практическую возможность того, как работать с самыми мелкими объектами, которые присутствуют в исходных данных, но слишком малы для используемого инструмента. Достаточно растянуть данные в  $C_i$  раз, и для инструмента становится доступной информация, которая в исходной ситуации «не работала». Например, имея ЦМР с разрешением 1 км/пикс и растянув ее в 3 раза, получим нашим инструментом практически те же хребты и долины, что и по данным с исходным разрешением 333 м/пикс. Полученные результаты будут не строго идентичные, но очень похожие как на вид, так и статистически.

Проверим это на практике по статистическому результату упомянутого выше мультимасштабного анализа, в котором исследуется изменение среднего направления хребтов и долин при изменении размера (масштаба) анализируемых объектов. Начинаем измерения с самых мелких объектов и постепенно переходим ко все более крупным. Ищем ситуации, когда при небольшом изменении масштаба изучаемых объектов их среднее направление в окне меняется резко (скачком). Оказалось, что эти скачки происходят не одинаково часто при разных масштабах. Нас интересует, при переходе к каким масштабам эти скачки происходят особенно часто. Такие «особые масштабы» обнаруживаются по пику в гистограмме скачков. Таким образом, гистограмма, которая показывает число скачков для разных масштабов, и является нашим конечным результатом. Выбрана такая территория и такой интервал масштабов, что гистограмма имеет ярко выраженный пик. Если операции с исходными данными (описанные ниже) будут неадекватны, то изменение в получаемых результатах скажется на форме или расположении пика.



*Рис. 2. Гистограммы числа скачков среднего направления элементов рельефа участка Забайкалья при разных масштабах анализа ЦМР: а - гистограмма по полным исходным данным; б – гистограмма, полученная при частичном использовании растяжения более грубых данных. По оси ординат – относительное число скачков при каждом масштабе.*

Работаем с ЦМР того же участка «Шилка». Данные SRTM сжаты до разрешения 0,368 км/пикс (т.е. можно быть уверенным, что указанное разрешение реально) и далее сжаты до разрешения 0,521, 0,737, 1,042, 1,47, 2,084, 2,948 км/пикс. Для каждого масштаба ищем хребты, долины и их направление. Скачки определяем по резкому (выше порога) изменению среднего направления объектов в окне при изменении масштаба в 1,4 - 2 раза (один - два шага указанной шкалы масштабов). Гистограмма числа скачков для разрешения в интервале 0,737 – 2,948 км/пикс показана на *рис. 3а*. Она будет служить для нас эталоном. Далее данные с разрешением 1,042 км/пикс, растягиваем в 1,4, 2 и 2,8 раза (т.е. до разрешения 0,737, 0,521 и 0,368 км/пикс, соответственно). Этими растянутым данными заменяем соответствующие исходные и в них повторяем выявление хребтов и долин, измерение их направления, поиск скачков - и получаем новую гистограмму (*рис. 3б*). Видим, что, если бы мы исходно располагали только ЦМР с разрешением 1,042 км/пикс, то могли бы получить по растянутым данным практически тот же результат, что и по ЦМР с разрешением 0,368 км/пикс.

### **Эффективное разрешение данных**

Практически разрешение данных может оказаться меньше заявленного ( $E$ ) – т.е. в данных нет самых мелких (по ширине) из возможных объектов. В этом случае можно несколько (в  $C_d$  раз) сжать данные без потери информации. Далекая аналогия этой ситуации – теорема Котельникова (если аналоговый сигнал имеет ограниченный по ширине спектр, то он может быть восстановлен однозначно и без потерь по отсчетам, взятым с частотой, строго большей удвоенной верхней частоты).

Отличие эффективного разрешения данных ( $E_d = E \cdot C_d$ ) от заявленного может возникнуть как из-за свойств территории (нет мелких объектов), так и из-за процесса получения данных, и в частности:

- из-за свойств датчика (например, перекрывается апертура соседних сенсоров);
- из-за источника данных, в котором нет деталей малого размера (например, на карте при интерполяции изолиний);
- из-за свойств алгоритма (например, фотограмметрия).

При оценке величины  $C_d$  важно учитывать, какие именно объекты мы ищем, какие подробности нам важны, что для нас объект в конкретной задаче, а что шум.

Рассмотрим поиск хребтов и долин в сложных данных, на примере которых можно показать разные аспекты этой задачи. Используем ЦМР Луны GLD-100 (Коханов и др., 2011), для которой заявлено разрешение около  $E=100$  м/пикс. Реально там нет ни хребтов, ни долин шириной в 1 пиксел. У самых узких из них ширина примерно 7 пикселей, а значит  $C_d < 7$ . Если взять с запасом,  $C_d = 3,5$ , то эффективное разрешение этих данных можно оценить как  $E_d = E * C_d = 350$  м/пикс. Нет более мелких объектов для нашего анализа. Учитывая, что наш инструмент фактически будет работать с  $E_i=300$ , эти данные не слишком грубые, вполне соответствуют инструменту (рис. 3).

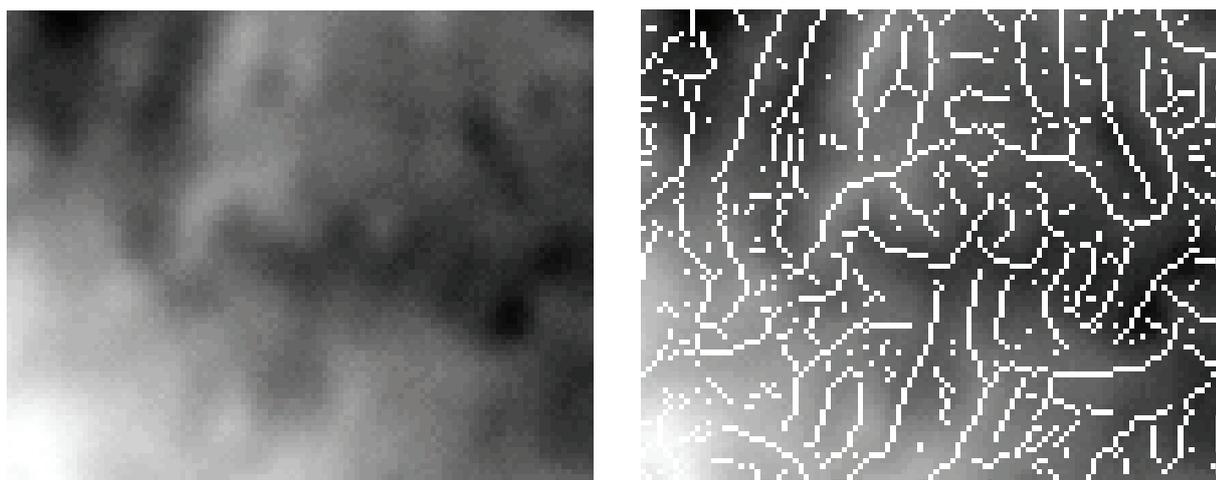


Рис. 3. Фрагмент ЦМР Луны слева (светлее - выше) и найденные в ЦМР линии хребтов и долин справа

Однако ситуация с этими данными более сложная, так как в них присутствует шум в виде «ячеек» (которые хорошо видны на рис. 4), их ширина, в основном, до 12-15 пикс. Чтобы не считать статистику направлений по этому шуму, нужно работать с объектами, которые больше шума – т.е. с разрешением от 1200 м/пикс. Для этого нужно сжать ЦМР, но, учитывая эффективное разрешение инструмента, достаточно сжать исходные данные не в 12, а только в 4 раза ( $1200/E_i=4$ ).

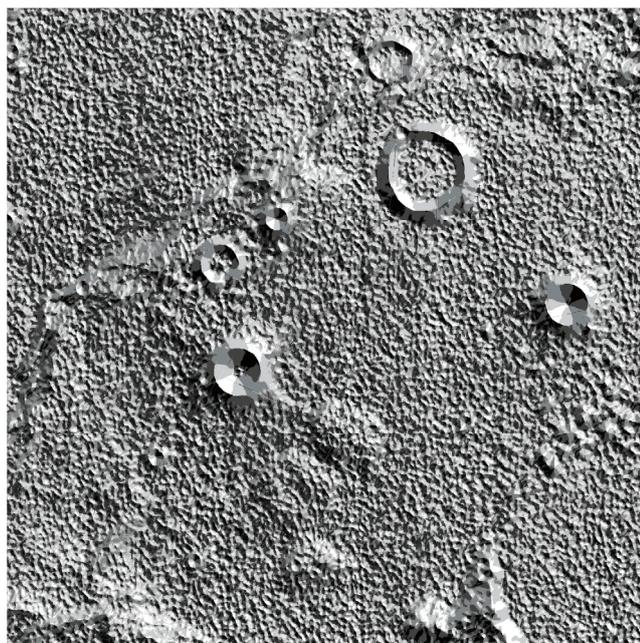


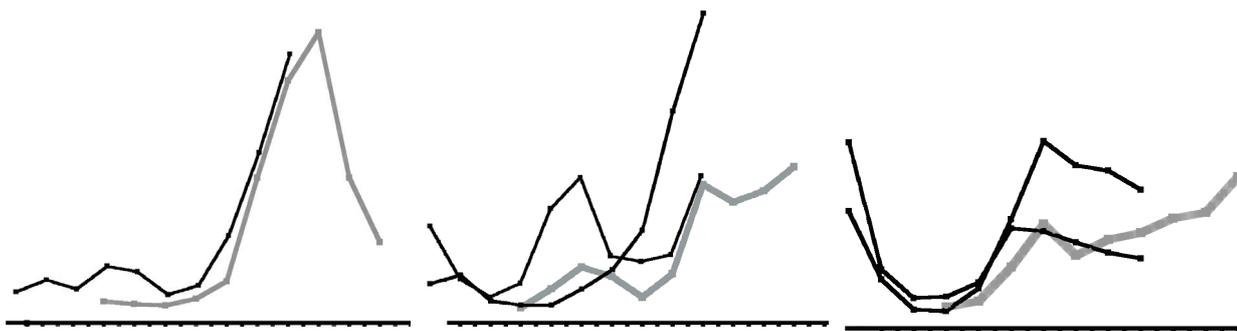
Рис. 4. Пример «подсвеченного» фрагмента ЦМР Луны

#### Соотношение эффективного разрешения инструмента и данных

1.  $E_d = E_i$ . Разрешение данных соответствует инструменту.
2.  $E_d < E_i$ . Разрешение данных избыточно, т.е. реально самые мелкие детали данных «не работают». Но можно растянуть данные, чтобы учесть и эти детали.
3.  $E_d > E_i$ . Разрешение данных недостаточно, например, если  $E_d/E_i = 2$ , то, предполагая, что работаем с объектами минимальной ширины 300 м, практически работаем с объектами шириной от 600 м. Такие данные можно сжать в  $E_d/E_i$  раз без потери искомой информации.

#### Пример учета эффективного разрешения инструмента

В мультимасштабном анализе, о котором говорилось выше, исследовались цифровые модели рельефа (SRTM) с разрешением 0,0651 км/пикс. Масштаб анализа последовательно изменялся в 1,41 раза и искалось резкое, скачком изменение направления долин и хребтов. Размер исследуемых областей был примерно 600\*600 км, и окно оценки направления хребтов и долин 94 км, три области - «Шилка», 48...56 с.ш. 111...123 в.д., «Татария» 48...57 с.ш. 52...58 в.д., «Воронеж» 48...57 с.ш. 37...45 в.д.. С помощью инструмента LESSA последовательно выявлялись и измерялись объекты в масштабах от 0,0651 до 2,9488 км/пикс (ориентировочно их длина меняется от 1 до 45 км). Гистограммы скачков, рассчитанные для этих территорий, показаны на рис. 5 толстыми серыми линиями (эти линии правее).



*Рис. 5. Гистограммы скачков направления при разных масштабах анализируемых элементов рельефа для трех областей – «Шилка», «Татария» и «Воронеж». По оси абсцисс отложен масштаб, который изменяется от 46 до 2948 м/пикс. По оси ординат – относительное число скачков при каждом масштабе.*

Исходя из найденной выше оценки эффективного разрешения инструмента LESSA -  $E_i$  в 3 раза больше чем  $E_d$  - можно, растянув исходные данные, получить результаты по самым мелким структурам, которые в 3 раза мельче тех, что учитывались исходно.

Фрагменты исследованных территорий (примерно 230\*230 км) были растянуты в 2,8 раза, до разрешения 23 м/пикс (окно анализа 33 км). Исследован один фрагмент для довольно однородной территории «Шилка» и по два фрагмента для других территорий. Выявлялись и измерялись объекты в масштабах 23 – 1050 м/км (длиной ориентировочно от 0,7 до 1,6 км). Гистограммы скачков для этих фрагментов показаны на рис. 5 тонкими черными линиями (левее).

Таким образом, благодаря работе с растянутыми данными появилась возможность исследовать тот диапазон масштабов (23 – 65 м/пикс), для которого, как казалось, не было исходных данных. Подтвердились «особые масштабы», которые были видны в исходном диапазоне (пики в серых линиях), а главное обнаружилось новые особенности в диапазоне крупных масштабов (пики в черных линиях).

В заключение отметим, что введенные параметры эффективного разрешения позволяют точнее понять, с объектами какого размера (масштаба) мы работаем, позволяют аккуратнее соотнести возможности используемого инструмента и данных, показывают возможности ускорения или детализации анализа.

Хотя в статье приведены примеры только поиска хребтов и долин в ЦМР, но эффективное пространственное разрешение можно оценивать, использовать и в других аналогичных ситуациях. Например, при работе с операторами края в изображении.

## Литература

1. Златопольский А.А. Мультимасштабный анализ ориентации текстуры поверхности Земли. Особые масштабы. Вторая часть. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 295-304.
2. Златопольский А.А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 38-46.
3. Коханов А.А., Креславский М.А., Карачевцева И.П., Матвеев Е.Н. Картографирование расчлененности поверхности Луны на основе глобальной цифровой модели рельефа GLD100 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 136-153.

## Effective data and instrument spatial resolution. By the example of a multiscale DTM analysis

A.A. Zlatopolsky

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: aazlat@gmail.com*

Real resolutions of remote sensing data and data processing instruments are examined. An idea of “effective resolution” is introduced. Data effective resolution characterizes the size of the smallest features that are really present in these data. Data processing instrument effective resolution characterizes the size of the smallest features that could be really detected by that very instrument. Examples of the effective resolution estimation and applications are provided. It is demonstrated how to compare data and instrument effective resolutions and how to detect the smallest data features that are not “seen” by the instrument. An example of those parameters usage in the multiscale relief elements statistical investigation is presented. In the investigation, the mean relief elements orientation is measured for the relief elements. Orientations of the different size (scale) relief elements are compared. Sometimes, small data scale change leads to a significant change - “jump” - in orientation. We are primarily interested in those “special scales”, passing to which is much more often accompanied by such jumps, compared to passing to other scales. In our research, a digital terrain map of the Earth surface (SRTM) and that of the Moon surface (GLD-100) were analyzed using the LESSA software (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis).

**Keywords:** data resolution, digital terrain map, multiscale analysis, special scales.

## References

1. Zlatopolsky A.A., Mul'timasshtabnyj analiz orientacii tekstury poverhnosti Zemli. Osobyje masshtaby. Vtoraja chast'. (Multiscale Earth surface texture orientation analysis. Special scales. Part two.), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 295–304.
2. Zlatopolsky A.A., Noveye vozmozhnosti tehnologii LESSA i analiz cifrovoj modeli rel'efa. Metodicheskij aspekt. (New LESSA technology resources and digital terrain map analysis. Methodology.), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 38-46.
3. Kokhanov A.A., Kreslavskiy M.A., Karachevtseva I.P., Matveev E.N. Kartografirovanie raschlenennosti poverhnosti Luny na osnove global'noj cifrovoj modeli rel'efa GLD100. (Mapping of the statistical characteristics of the liner relief on the basis of the global elevation model GLD-100), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 136–153.