

## Мультимасштабный анализ цифровой модели рельефа. Экспериментальные закономерности

А.А. Златопольский

*Институт космических исследований РАН  
Москва, 117997, Россия  
E-mails: aazlat@gmail.com*

В статье представлены экспериментальные результаты анализа хребтов и долин, выявленных в цифровых моделях рельефа с помощью автоматизированной технологии LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis). Проанализирован широкий круг разнообразных территорий Земли в большом диапазоне масштабов. Оказалось, что средняя суммарная длина хребтов и долин (совместно) линейно растет при изменении масштаба анализа (при росте разрешения). Возможно, это связано с фрактальными свойствами рельефа. Для получения надежных результатов измерения среднего направления хребтов и долин экспериментально найден адаптивный порог для величины согласованности направления хребтов и долин. Сравнивая среднее направление элементов рельефа разного масштаба, определяли, при переходе к какому масштабу направление изменяется существенно при небольшом изменении масштаба, т.е. скачком. По широкому кругу территорий проявились «особые масштабы», при переходе к которым направление рельефа изменяется скачком гораздо чаще, чем при переходе к другим масштабам. Возможно, этот результат отражает дискретность размеров тектонических структур, которая предполагалась в ряде исследований. Существенно то, что «особые масштабы» проявились в результате автоматизированного измерения и технологические параметры измерения не влияют на этот общий результат.

**Ключевые слова:** цифровая модель рельефа, хребты и долины, мультимасштабный анализ, особые масштабы, фрактальность

### Введение

Анализ свойств элементов рельефа – долин и хребтов – по цифровой модели рельефа (ЦМР) позволил обнаружить ряд закономерностей, которые, возможно, будут полезны, как для аккуратной, грамотной работы с ЦМР, так и для выявления собственно свойств рельефа.

Растровая основа ЦМР позволяет плавно менять масштаб анализа (делая исходную ЦМР более грубой). При этом происходит естественная генерализация формы элементов рельефа – исчезают мелкие формы и на первый план выходят более крупные. Автоматическая технология выявления и измерения долин и хребтов позволяет получать объективные результаты измерения для элементов разного размера (масштаба, ранга) в едином ключе и сравнивать их. Как при поиске хребтов и долин, так и при их измерении необходимо учитывать особенности работы на растре – связность (толщина) получаемых линий, их расположение относительно растра (например, хребет в 7 пикселей при расположении вдоль растра, может занимать только 5 пикселей, если он расположен по диагонали к растру) и т.п. В этой работе использована технология LESSA (Златопольский, 2011), десятки лет ее эксплуатации позволили адекватно оценивать уровень аккуратности и надежности результатов.

В этом исследовании использованы цифровые модели рельефа (SRTM) с разрешением 0,0625 км/пикс. Исследованы территории с совершенно различным рельефом – от Русской равнины и бассейна Амазонки до Тибета, но не включались области с заведомо бедным «пустынным» рельефом. Основной массив измерений выполнен на 18 областях размером около 400000 кв. км. каждая, которые расположены в разных частях Земли. Для каждой области

проводилось 12 шагов измерений с масштабами анализа различающимися в  $\sqrt{2}$  раз, т.е. разрешение на масштабе  $i$  было  $0,0625 \cdot (\sqrt{2})^i$  км/пикс ( $i=0, 1, \dots, 11$ ). Для того, чтобы характеризовать масштаб анализа интуитивно более понятным образом, очень приблизительно укажем абсолютный размер элементов, которые дают основной вклад в измерение при каждом масштабном шаге – длина прямого участка хребта (долины)  $L = (\sqrt{2})^i$  км и его ширина (по низу противоположных склонов)  $0,4 \times L$  км, т.е. для шагов 0, 1, 2 ... 11 – длина соответственно 1 км (ширина 0,41 км), 1,4 км (0,566 км), 2 км (0,82 км) ... 45 км (18 км). На этом массиве данных выявлялись элементы рельефа, измерялись их длина и направление (в каждой точке), а затем в окнах размером 93,76 км рассчитывались плотность и среднее направление этих элементов.

Для оценки ситуации в других масштабных диапазонах проанализированы 5 «фрагментов» этих областей (с разрешением в 3 раза больше) и 9 «больших» охватывающих областей (с разрешением в 3–5 раз меньше). Расположение большинства областей детально описано и показано в (Златопольский, 2013).

Цель данной публикации – представить закономерности, которые были выявлены в ходе этих измерений: как изменяется плотность элементов от области к области и от масштаба к масштабу, как оценить достоверность измерения среднего направления и как с учетом этих обстоятельств выглядит статистика скачков среднего направления при смене масштаба анализа. Основные детали мультимасштабного исследования скачков направления изложены ранее (Златопольский, 2012), а здесь приведены общие результаты.

### **Плотность элементов рельефа**

Анализ начинается с автоматического выявления цепочек пикселей, относящихся к осям хребтов и долин. Одновременно определяется и их направление в каждой точке. Плотность элементов рельефа в окне расчета – это отношение суммарного числа пикселей и хребтов и долин к площади окна, которая также измерена в пикселях. Рассмотрим, как изменяется эта величина в зависимости от изменения регионов и масштабов анализа. От настроек процедуры поиска хребтов и долин эта величина может меняться существенно, например, при поиске только долин она уменьшится примерно в 2 раза, при ужесточении допусков на прямизну искомым долин может уменьшиться также сильно. Поэтому в описываемых исследованиях параметры поиска не меняются, зафиксированы. Оказалось, что внутри анализируемых территорий плотность изменялась в среднем в 1,5 раза, случалось, что и в 2,8 раза (размер интервала значений включающего 90% результатов). Измерив среднюю плотность для каждой территории и каждого масштаба анализа, обнаружили, что она меняется вокруг значения 0,2 в очень небольших пределах. Случалось, что от территории к территории она отклонялась на 10% от этого значения, при стандартном отклонении в 5%. При изменении масштаба средняя плотность отклонялась на 15%, при стандартном отклонении 5%. Этот результат оказался довольно неожиданным, учитывая, что масштаб изменялся в 45 раз, а абсолютная величина суммы пикселей в хребтах и долинах (в окне)

менялась при этом примерно в 2000 раз. Проанализировав часть «больших» областей и «фрагментов», получили значения средней плотности того же диапазона и с такой же слабой динамикой при изменении масштаба.

Кроме того, тестировалось, сохраняется ли столь малая зависимость плотности элементов рельефа от масштаба не в среднем, а в отдельных окнах расчета. Для всех окон области «Шилка» были проделаны следующие измерения. Рассчитывалось изменение плотности найденных элементов рельефа в окне при изменении масштаба анализа в 4 раза – от шага 1 к шагу 5 и от шага 5 к шагу 9. Несмотря на такое существенное изменение масштаба, плотности изменялись мало – в первом случае плотность изменялась в среднем в 0,8458 раза (со стандартным отклонением 0,0858), а во втором случае – в среднем в 1,01 раза (со стандартным отклонением 0,0642).

Интересно понять, чем вызван этот эффект столь малой вариативности средней плотности. Маловероятно, что это вызвано особенностями использованной процедуры поиска элементов рельефа (LESSA), так как даже внутри одной области от окна к окну плотность может меняться в разы, а постоянство отмечается именно для среднего значения. Исследователи, располагающие другими инструментами выявления и измерения элементов рельефа, могли бы проверить этот результат.

Напомним, что средняя плотность рассчитывается как отношение числа пикселей в найденных осях хребтов и долин к числу пикселей в окне. Когда в окне расчета постоянной площади (в километрах) мы переходим к анализу более мелких элементов рельефа, увеличивая разрешение в  $K$  раз (т.е. значение разрешения становится меньше в  $K$  раз), то число пикселей в окне становится больше в  $K \times K$  раз, а значит, (при почти постоянной плотности) и число пикселей хребтов и долин становится больше в  $K \times K$  раз. При этом «длина пикселя» (в километрах) уменьшается в  $K$  раз, и в итоге суммарная длина хребтов и долин в окне при более детальном анализе становится больше в  $K$  раз.

Такое постоянное увеличение суммарной длины хребтов и долин при переходе к измерению более мелких элементов рельефа прямо соответствует понятию фрактальности в описании Мандельброта. Таким образом, если описанный выше факт отражает фрактальность рельефа, то мы получили оценку того, что с увеличением детальности анализа рост суммарной длины элементов рельефа происходит линейно, обратно пропорционально использованной величине разрешения ЦМР.

Конечно, важно помнить, что отмеченный результат получен для рассмотренного диапазона масштабов и для данного, достаточно качественного, источника ЦМР.

### **Среднее направление элементов рельефа**

При выявлении пикселей, относящихся к хребтам и долинам, в технологии LESSA одновременно определяется и их направление в каждой точке. Локальное направление на растре определяется довольно грубо – с точностью 22,5 градуса в диапазоне 0–180 градусов,

т.е. фиксируется одно из 8 направлений  $a(k)=k \times 22,5$ ,  $k=0,1 \dots 7$ . По этим данным определяется среднее направление элементов рельефа в окне анализа по формуле  $A=(\arctg(S/C))/2$ , где  $S = \sum_{k=0}^7 h(k) \cdot \sin(2 \cdot a(k))$ ,  $C = \sum_{k=0}^7 h(k) \cdot \cos(2 \cdot a(k))$ ,  $h(k)$  – суммарная длина в окне линий направления  $k$  (Чини, 1986). Важно иметь в виду, что направление элементов рельефа может быть сконцентрировано вокруг одного значения, т.е. все вытянуто примерно в одну сторону, а может быть и равномерно распределено по всем направлениям. В последнем случае величина среднего направления, вычисленного по предложенной формуле, будет не устойчива в том смысле, что очень небольшое изменение в элементах рельефа может кардинально изменить величину среднего. Степень достоверности, в этом смысле, найденного среднего направления оценивается величиной  $R = \sqrt{(S^2 + C^2) / H}$ , где  $H = \sum_{k=0}^7 h(k)$ . Эта величина – будем называть ее «вытянутостью» – показывает, насколько элементы рельефа вытянуты в одном направлении: если у всех одно направление, то  $R=1$ , а если направления распределены равномерно (или одинаково представлены 2 ортогональных направления), то  $R=0$ . Необходимо использовать для анализа только достаточно достоверные результаты, задав порог по вытянутости,  $R > Tr$ .

Анализ структур столь разного размера в одном окне порождает следующую проблему. Суммарное число пикселей в самых мелких структурах (масштаб 0) примерно в 2000 раз больше, чем в самых крупных (масштаб 11). Когда число измерений возрастает столь сильно, растет и разброс направлений, а, значит, величина вытянутости падает. С другой стороны, большое число измерений несколько увеличивает достоверность полученного среднего. Так, оценка доверительного интервала для среднего направления при распределении, аналогичном для направлений нормальному (Чини, 1986), обратно пропорциональна  $R$ , что естественно, но также обратно пропорциональна и  $\sqrt{H}$ . То есть дополнительные измерения могут несколько компенсировать уменьшение вытянутости, сохраняя величину доверительного интервала. Аналогичным образом имеет смысл уменьшать порог вытянутости  $Tr$  при анализе более многочисленных структур.

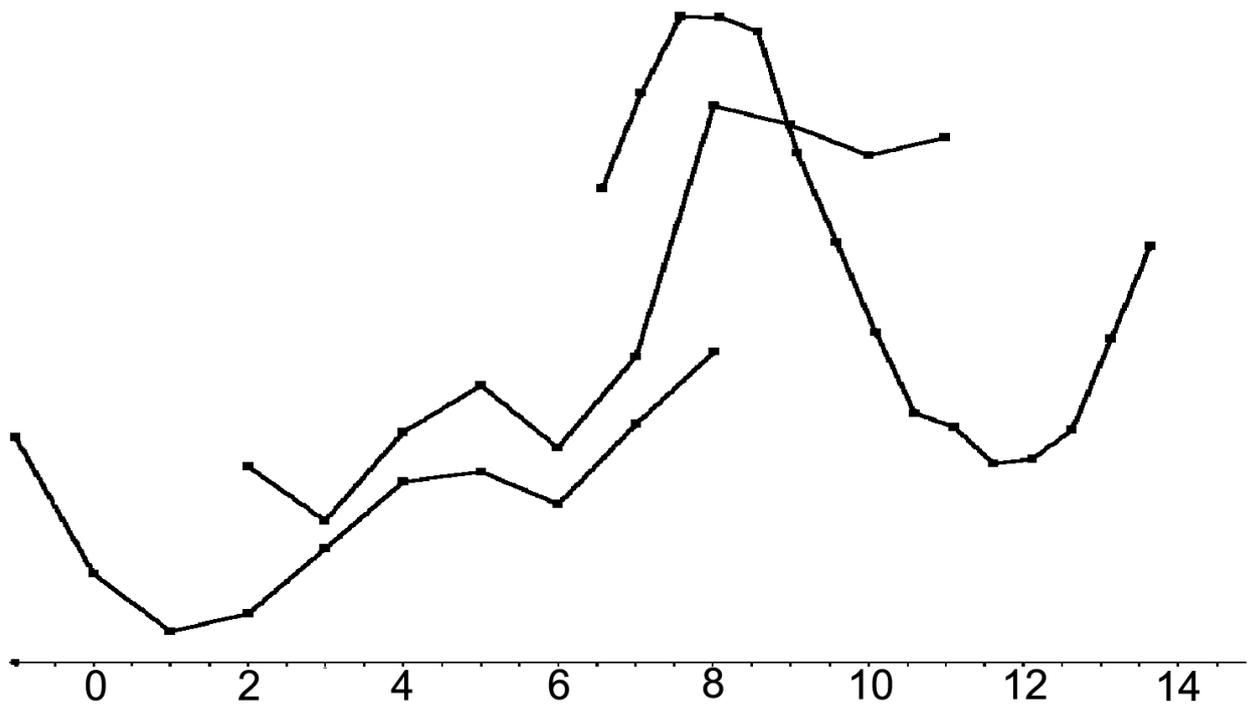
Экспериментально была найдена зависимость  $Tr = d / \sqrt{\sqrt{H}}$ , где  $d$  – константа. В указанном диапазоне масштабов подобрано значение  $d=3,85$ , при котором (в среднем по всем областям) порог отсекает примерно 10% самых «не вытянутых» измерений, что вполне разумно. Тестовые измерения с разными значениями  $d$  показали, что для наших исследований уменьшение  $d$  ведет к появлению явно нерепрезентативных измерений направления, а при увеличении  $d$  результаты меняются мало, но резко уменьшается число данных, доступных для анализа.

Не настаивая на оптимальности полученной зависимости, отметим необходимость использовать адаптивный порог, зависящий от числа измерений (элементов рельефа).

## Статистика скачков направления элементов рельефа.

### Особые масштабы

Геологи исследуют влияние масштабного фактора на преимущественную ориентировку структур – ищут закономерности в изменении ориентировки (Милосердова, 1982).



*Рис. 1. Гистограммы скачков направления при разных масштабах анализируемых элементов рельефа для областей трех размеров (3х диапазонов масштаба): в центре – для основного размера, слева – для «фрагментов», справа – для «больших». По оси абсцисс отложены номера масштабных шагов, по оси ординат – относительное число скачков при каждом масштабе*

Однако при этом исследовались субъективно отмеченные (выявленные) структуры, в то время как рассматриваемая технология позволяет автоматически выявлять элементы рельефа, измерять и сравнивать свойства элементов разного масштаба.

Рассмотрим, как изменяется среднее направление структур разного масштаба в окне, если переходить от анализа исходного масштаба (шаг 0) к следующему (шаг 1) и т.д. Нас будут интересовать те случаи, когда направление изменяется резко (больше порога) и быстро (за 1 или 2 масштабных шага). Обнаружив, что при переходе к какому-то масштабному шагу происходит такой скачек направления, добавляем единицу в гистограмму скачков на этом шаге. Полученная таким образом гистограмма по всем окнам 18-ти областей представлена на *рис. 1* в центре. Дополнительно, для сопоставления с особенностями этой гистограммы, показаны гистограммы для 9 больших областей (правее) и 5 фрагментов (левее). Так как эти дополнительные гистограммы рассчитаны по небольшому числу областей, специально их анализировать не будем, но по ним видно, как сохраняются особенности центральной гистограммы при смене исследуемого диапазона масштабов. Напомним, что разрешение на масштабном шаге  $i$  составляет  $0,0625 \cdot (\sqrt{2})^i$  км. Последовательности масштабов дополнительных областей начинаются с другого начального масштаба, но легко могут быть включены в общий график через дробные и отрицательные значения  $i$  (например,  $0,0156 \cdot (\sqrt{2})^1$  эквивалентно  $0,0625 \cdot (\sqrt{2})^{-3}$ ).

Основная особенность полученной гистограммы в том, что она не равномерна. Есть два «особых масштаба» – шаги 5 и 8 – при переходе к которым скачков существенно больше,

чем при других масштабах. Особенно отчетлив пик на шаге 8. Наличие явно выраженных пиков – это самый существенный и довольно неожиданный результат, ведь в одну гистограмму сведены измерения по тысячам окон столь разных территорий. Получается, что есть «особые масштабы», при переходе к которым изменение направления элементов рельефа происходит гораздо чаще, чем при переходе к другим.

Рассмотрим теперь гистограммы отдельных областей. В этих гистограммах на порядок меньше измерений, но они достаточно информативны, чтобы оценить их форму в целом. Яркие пики есть в гистограммах 6 областей, а равномерных гистограмм не оказалось совсем, т.е. везде есть колебания значений как минимум в 2 раза. В двух группах по 6 областей гистограммы схожи между собой. В первой группе гистограмм один пик на 8 шаге, (рис. 2а), а в другой – пик на 5 (или 4) шаге и частично на 10 шаге (рис. 2б). Среди оставшихся областей, в 3х пик на 6 или 7 шаге, и в 3х сильный рост гистограммы к крайним масштабам (возможно, пик находится на краю или за краем рассмотренного интервала масштабов). По двум указанным группам можно предположить, что есть несколько последовательностей особых масштабов (выявились две), а в общей гистограмме проявляются пики разных последовательностей.

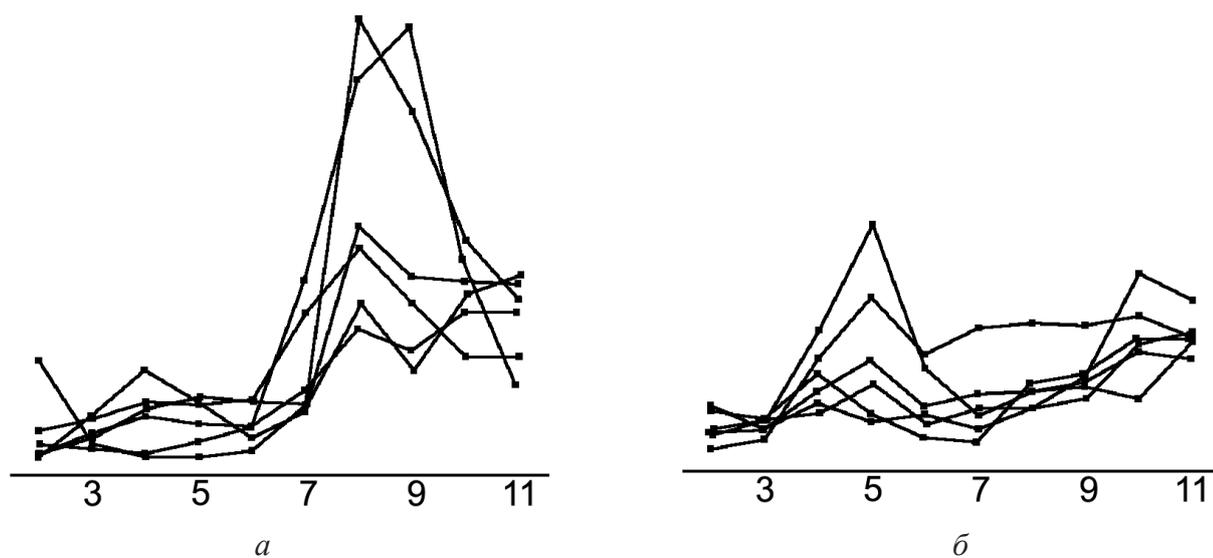
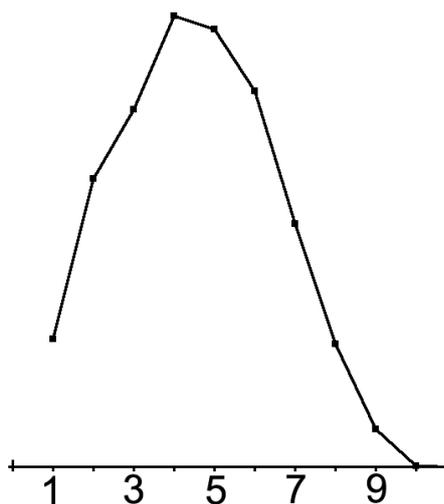


Рис. 2. Две группы гистограмм скачков направления при разных масштабах анализируемых элементов рельефа

Рассмотрим еще один довод в пользу того, что пики в общей гистограмме на шаге 5 и 8 относятся к разным последовательностям особых масштабов. В тех случаях, когда среднее направление в окне существенно изменяется не один раз, измерим диапазон масштабов между первым скачком и следующим скачком, и построим гистограмму этих диапазонов (рис. 3).

Сложно ожидать, что повторное резкое изменение направления будут происходить при малом изменении масштаба. Скорее всего, изменения на последовательных шагах происходят при ошибке в определении направления – оно ошибочно резко изменяется, а затем



*Рис. 3. Гистограмма диапазонов масштаба между резкими изменениями среднего направления в окне. По оси абсцисс отложен диапазон масштабов (шагах). По оси ординат – относительное число таких диапазонов*

сразу возвращается к исходному значению. И действительно, в гистограмме зафиксировано мало изменений с диапазоном 1–2 шага, чаще всего повторное изменение направления происходит через 4–5 шагов. О диапазонах в 7–9 шагов судить трудно – им сложно реализоваться при 12 шагах по масштабу, а больше 9 шагов мы и не обнаружим. Таким образом, повторная смена направлений чаще всего происходит больше чем через 3 шага, скорее всего через 4–5 шагов. Пики группы областей на рис. 2б (на 5 и 10 шаг) так и расположены через 5 шагов. В другой группе в пару к пику на шаге 8 можно ожидать пик на шаге 3, но он, возможно, не реализовался из-за близкого края диапазона анализа.

### Выводы

Автоматизация поиска и измерения элементов рельефа позволила установить статистические закономерности, которые стоит учитывать при подобных измерениях. Возможно, эти закономерности отражают и свойства рельефа, формирующих его сил, и полученные результаты могли бы послужить исходным пунктом дальнейшего тематического исследования.

1. При том что плотность элементов рельефа может меняться в разы, ее среднее значение при изменении как области, так и масштаба анализа меняется мало (при неизменных параметрах анализа). В частности из этого следует, что средняя длина хребтов и долин при увеличении детальности анализа в  $K$  раз, также растет в  $K$  раз, что возможно отражает фрактальные свойства рельефа.

2. Измеряя среднее направление элементов рельефа, важно учитывать достоверность (устойчивость) полученного результата. Для этого предлагается использовать известную величину вытянутости с учетом порога, который зависит от числа измерений в окне анализа.

3. При изменении масштаба анализа хребтов и долин изменяется, и иногда – скачкообразно, их среднее направление. Есть «особые масштабы» при переходе к которым, скачки направления происходят особенно часто. Отмечено два таких масштаба. Возможно, этот результат соотносится с ранжированием тектонических структур и может вызывать не только теоретический, но и практический интерес, т.к. ранговый подход к рассмотрению структур «позволяет выявить скрытые закономерности в характере связи данной структурной поверхности и размещения нефтяных и газовых месторождений» (Дмитриевская и др., 2000).

Если особые масштабы отстоят друг от друга примерно в 4–5 раз, то, возможно, найденные особые масштабы относятся к двум последовательностям, сдвинутым друг относительно друга. Пока это только предположение, однако и автор исследования дискретности размеров геологических объектов (Шкарин, 1988) на основе анализа многочисленных источников оценил средний шаг между тектоническими структурами разного ранга – в среднем около 2, и при этом он предположил, что «присутствует два иерархических ряда структур с примерно равным шагом, но со «сдвигом по фазе».

## Литература

1. Дмитриевская Т.В., Рябухина С.Г., Дворецкий П.И., Пономарев В.А., Зайцев В.А. Влияние структуры поверхности фундамента на характер распределения нефтяных и газовых месторождений Тимано-Печорского бассейна // Геология нефти и газа. 2000. № 4. С. 56–58.
2. Златопольский А.А. Мультимасштабный анализ ориентации текстуры поверхности Земли. Особые масштабы. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 26–37.
3. 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.
4. 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.
5. Милосердова Л.В. О влиянии масштабного фактора на преимущественную ориентировку мегатрещиноватости // Вестник МГУ, сер. геолог., 1982. № 4. С. 99–103.
6. Чини Р.Ф. Статистические методы в геологии Пер. с англ., М.: Мир, 1986. 189 с.
7. Шкарин В.В. Дискретность размеров геологических объектов и дистанционные методы. Автоматизированный линеamentный анализ при структурно-геологических и металлогенических исследованиях. Л.: ВСЕГЕИ, 1988. С. 35–48

# Multiscale digital terrain map analysis. Experimental regularities

A.A. Zlatopolsky

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

The paper presents experimental results of ridge and valley analysis carried out by automated LESSA (“Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis”) software. Digital terrain maps of a wide range of regions of the Earth were analyzed in a wide range of scales. Results showed that summary ridges and valleys length grows linearly with the increase in scale (increased resolution). This may be due to the fractal feature of terrain. In order to obtain reliable measurement of the direction of ridges and valleys an additive threshold value for the concurrency of ridges and valleys was experimentally determined. Mean orientation of the different size (scale) relief elements orientation were compared. Sometimes small data scale changes lead to significant change – “jump” – in orientation. After analysis of a large range of terrains, “special scales” were found, for which this “jump” occurred much more frequently than for other scales. It is possible, that this result shows that sizes of tectonic structures are discrete, which was proposed in a number of publications. It is important to note that these “special scales” were found as a result of automated analysis and that technological parameters of measurement do not influence this general result.

**Keywords:** digital terrain map, ridges and valleys, multiscale analysis, special scales, fractality

## References

1. Dmitrievskaya T.V., Ryabukhina S.G., Dvoretiskii P.I., Ponomarev V.A., Zaitsev V.A.. Vliyanie struktury poverkhnosti fundamenta na kharakter raspredeleniya neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii Timano-Pechorskogo basseina (Basement surface structure effect on the character of the oil and gas deposits distribution in the Timano-Pechorsky basin), *Geologiya nefi i gaza*, 2000, No. 4, pp. 56–58.
2. Zlatopol'sky A.A. Mul'timasshtabnyi analiz orientatsii tekstury poverkhnosti Zemli. Osobyie masshtaby (Multyscale Earth surface texture orientation analysis. Special scales), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 32, pp. 26–37.
3. Zlatopol'sky A.A. Mul'timasshtabnyi analiz orientatsii tekstury poverkhnosti Zemli. Osobyie masshtaby. Vtoraya 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.
4. Zlatopol'sky A.A. Novye vozmozhnosti tekhnologii LESSA i analiz tsifrovoi modeli rel'efa. Metodicheskii 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.
5. Miloserdova L.V. O vliyani masshtabnogo faktora na preimushchestvennyuyu orientirovku megatreshchinovosti (Scaling effect on the megafaults orientation), *Vestnik MGU, ser. geolog.*, 1982, No. 4, pp. 99–103.
6. Cheeney, R. F. *Statistical Methods in Geology*, London, 1983, 169 p.
7. Shkarin V.V. Diskretnost' razmerov geologicheskikh ob'ektov i distantsionnye metody (Geological objects size discontinuity and remote sensing), In: *Avtomatizirovannyi lineamentnyi analiz pri strukturno-geologicheskikh i metallogenicheskikh issledovaniyakh* (Automated lineament analysis in structural geological and metallogenic studies), Leningrad: VSEGEI, 1988, pp. 35–48.