

Мульти尺度ный анализ ориентации текстуры поверхности Земли. Особые масштабы. Вторая часть

А.А. Златопольский

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
E-mail: aazlat@gmail.com

Публикуются новые результаты исследования ориентационных статистических характеристик элементов рельефа разного масштаба. Анализ разнообразных территорий показал, что существуют масштабы, при переходе к которым рисунок рельефа изменяется особенно часто. Это проявляется как на отдельных территориях, так и в целом. Описано, какие меры приняты для получения объективных результатов, и обсуждается, как интерпретировать результаты.

Ключевые слова: ориентационные характеристики, цифровая модель рельефа, мульти尺度ный анализ, особые масштабы.

Вступление

В статье рассматриваются свойства рисунка элементов рельефа разного масштаба (размера), трансформация характеристик рисунка рельефа при переходе от анализа элементов одного масштаба к анализу элементов другого масштаба: если рисунок этих элементов изменяется, то при какой именно смене масштаба. Нас будут интересовать серьезные изменения, которые происходят при небольшом изменении масштаба анализа, т.е. «быстро», «скачком» (иначе неясно, к какому масштабу отнести эти изменения). Результаты исследования могут быть полезны при изучении характеристик рельефа – учитывать, что при некоторых масштабах найденные характеристики могут резко измениться. Но главное, можно получить выход на автоматическое определение «ранговости» в структуре рельефа.

В качестве индикатора изменения рисунка рельефа используем среднее направление хребтов и долин в рассматриваемом участке. Если такой обобщенный показатель существенно изменяется, то, значит, в рисунке произошли серьезные изменения, хотя, как увидим ниже, возможно и такое изменение рисунка, которое не приводит к изменению среднего направления.

Используемая методика анализа подробно описана в предыдущей работе (Златопольский, 2012). Там представлены первые результаты, которые показывают, что при некоторых масштабах (мы их назвали «особыми») быстрое, скачкообразное изменение характеристик рельефа происходит гораздо чаще, чем при других масштабах.

Рассмотрим ситуацию с «особыми масштабами» (ОМ) на существенно расширенном круге примеров. Покажем, чем обеспечивается и подтверждается объективность и надежность результатов, в чем сходство и в чем различие проявления «особых масштабов» на разных территориях.

Алгоритм анализа

Выявление масштабов, при переходе к которым резко, скачкообразно изменяется рельеф (его характеристика), происходит следующим образом. В цифровой модели рельефа выбранной области анализа (окно) автоматически выявляются линии хребтов и долин, изменяется их направление (в каждой точке этих линий) и вычисляется среднее направление. Получаем значение этого параметра для данного масштаба. Загрубляем анализ – генерализируются, лучше проявляются более крупные элементы рельефа, исчезают (не видны) более мелкие – и получаем новое значение среднего направления линий хребтов и долин для той же области, но для более мелкого масштаба. Последовательность таких измерений дает нам кривую зависимости среднего направления от масштаба. Ищем на ней скачки – места достаточно большого и быстрого изменения. Если такие скачки обнаружены, то фиксируем, при каких именно масштабах они произошли, и переходим к анализу других областей (окон). В результате, мы получаем данные о том, как распределяются скачки по масштабам – равномерно или нет. Можно рассмотреть гистограмму распределения скачков по масштабам как для одной территории (соседние окна анализа), так и для разных территорий.

Остановимся на технических, но важных вопросах: что предпринято для получения достоверных результатов? что в этих результатах объективно отражает свойства рельефа, а что порождается принятой технологией измерения, т.е. является артефактом?

1. Элементы рельефа выявляются и измеряются автоматически, что позволяет получить объективные данные. Субъективный момент связан с выбором конкретной технологии измерения. Здесь использована LESSA (Златопольский, 2011), с которой есть большой опыт работы, протестированы точность и надежность статистических измерений.
2. Исключаются из анализа ситуации с ненадежно определенным средним направлением – когда равномерно присутствуют все направления или два равновеликих ортогональных направления (роза-диаграмма направлений близка к кругу или к кресту). Найден адаптивный критерий отсева таких ситуаций, который ориентируется на суммарную длину линий найденных в окнах; чем меньше измерений, тем жестче критерий.
3. Для получения достоверной гистограммы число независимых результатов (по не перекрывающимся окнам) должно быть достаточно большим (на каждый отсчет гистограммы в среднем больше 10 измерений).
4. Параметры, по которым определяется скачок.

Использован порог изменения в 40 градусов. Если требовали большую величину скачка, то скачков становилось существенно меньше, но форма гистограммы в целом сохранялась.

Мы учитываем только быстрые изменения среднего – за 1 или 2 шага – изменения масштаба. Быстрых изменений обычно достаточно много 40–60%, но и в случае, когда их относительно мало (30%), добавление к ним более медленных изменений (за 3 шага) не меняет форму гистограммы.

Результат устойчив к вариациям параметров анализа.

5. Иногда считают более обоснованным измерять характеристики только долин (не учитывать хребты). Этот вариант был опробован для одной из территорий. Результат – форма гистограммы совершенно не изменилась, только гистограмма стала менее населенной.
6. Необходимо в дальнейшем анализе учитывать, как в форме гистограммы отражаются технологические решения. Поскольку при изменении масштаба анализ ЦМР становится все более грубым, фоновый уровень случайных скачков, начиная с некоторого шага анализа (с некоторой «степени грубости»), существенно растет (судя по медиане гистограмм, он растет линейно). Подчеркнем, что этот «технологический рост» связан не с конкретными значениями масштаба, а только с порядковым номером масштаба в процессе анализа, т.е. если начать процесс измерений с более мелкого масштаба, то и масштаб, с которого начинается рост гистограммы, смещается соответственно. Этот рост проявляется часто и иногда экранирует искомые особенности гистограммы, но иногда яркие экстремумы перекрывают этот рост.

Исходные данные

В работе использованы цифровые модели рельефа (SRTM) с разрешением 0,0625 км/пикс. Во всех случаях было 12 шагов измерений с масштабами, различающимися в 1,41 раза. Для того чтобы характеризовать масштаб анализа не техническим параметром «разрешение», а интуитивно более понятным образом, будем использовать величину, которая очень примерно показывает абсолютный размер малых элементов обнаруживаемых при данном разрешении. Эта величина будет в 15 раз больше разрешения, т.е. мы начинаем с масштаба примерно в 1 км. (Еще более ориентировочно можно соотнести это с картографическим масштабом 1 : 100000.) Основная группа из 14 территорий исследовалась в одном и том же диапазоне масштабов – от 1 до 45 км (диапазон поиска экстремума, ДПЭ, от 3 до 32 км) с окном анализа 93,76 км. Каждую территорию далее будем именовать по характерному географическому названию. Ниже приводятся размеры и примерные географические координаты территорий.

Салонга	668*664 км	10260 *10200 пикселов	4 ю. ш. ... 2 с. ш. 18...24 в. д.
ЭрРутба	627*672 км	9631*10329 пикселов	30...36 с. ш. 36,5...43 в. д.
Скифия	527*627 км	8097*9635 пикселов	43,2...48,7 с. ш. 38,5...45 в. д.
Воронеж	582*953 км	8935 * 14632 пикселов	48...57 с. ш. 37...45 в. д.
Татария	617*682 км	9486*10496 пикселов	48...57 с. ш. 52...58 в. д.
Караганда	595*622 км	9140*9555 пикселов	46,8...52,2 с. ш. 68...75,8 в. д.
Памир	645*676 км	9914*10388 пикселов	34...40 с. ш. 70–77 в. д.
Ганг	632*670 км	9703*10291 пикселов	34...40 с. ш. 70–77 в. д.
Алтай	676*645 км	10384*9905 пикселов	48...53 с. ш. 83–92 в. д.

Селенга	619*568 км	9513 * 8719 пикселов	46...51 с. ш. 96...104 в. д.
Янцзы	586*682 км	9000 * 10480 пикселов	29...35 с. ш. 105...111 в. д.
Шилка	651*651 км	10000 * 10000 пикселов	48...56 с. ш. 111...123 в. д.
Мараба	667*775 км	10246 * 11908 пикселов	2...11 ю. ш. 47...55 з. д.
Атланта	571*686 км	8775 * 10533 пикселов	32...38 с. ш. 81...87 з. д.

Для областей такого размера можно ожидать, что проекционные искажения величины и направления структур рельефа невелики. Для областей большего размера искажения могут быть уже существенны, направление структур может сближаться, не обнаружатся скачки и т.п. И все же, принимая это во внимание, дополнительно рассмотрим и области, которые охватывают перечисленные и существенно (по площади на порядок) больше, чем они. Это нужно для того, чтобы

- оценить, насколько сохраняются особенности «мультимасштабного поведения» направления рельефа, если масштабы займут другое положение в цепочке измерений, т.е. связаны ли особенности гистограммы с конкретными значениями масштабов или определяются технологией (как отмеченный выше линейный рост);
- исследовать ситуацию в диапазоне больших масштабов.

Эту группу из девяти областей будем называть «большими», а предыдущую – «малыми». Для больших областей исходное разрешение, окна анализа и диапазоны масштабов несколько различаются.

<i>Название области</i>	<i>Размер</i>	<i>Расположение</i>	<i>Окно (км)</i>	<i>ДПЭ (км)</i>	<i>Включает области</i>
Конго	2091 * 2139 км 9131 * 9341 пикселов	10 ю. ш. ...9 с. ш. 13 ... 32 в. д.	330	10–109	«Салонга»
Волга	2130 * 1763 км 6544 * 5416 пикселов	44...60 с. ш. 32...63 в. д.	469	14–155	«Воронеж» «Татария»
Евфрат	1379 * 1481 км 7489 * 8042 пикселов	28...41 с. ш. 36...50 в. д.	265	8–89	«ЭрРутба»
Иртыш	1764 * 1730 км 9582 * 9397 пикселов	44...59 с. ш. 63...85 в. д.	265	8–89	«Караганда»
Байкал	2921 * 1839 км 8973 * 5651 пикселов	45...60 с. ш. 85...122 в. д.	469	14–155	«Шилка»
Китай	2933 * 2772 км 9010 * 8515 пикселов	21...45 с. ш. 84...112 в. д.	469	14–155	«Янцзы»
Амазонка	2236 * 2253 км 10299 * 10378 пикселов	2...22 ю. ш. 42...62 з. д.	313	9–104	«Мараба»
Мемфис	1921 * 1600 км 11809 * 9831 пикселов	30...42 с. ш. 81...100 з. д.	234	7–78	«Атланта»
США	4151 * 3080 км 10223* 7587 пикселов	29...57 с. ш. 75...125 з. д.	585	17–194	«Мемфис» «Атланта»

Расположение всех исследованных областей представлено на *рис. 1*.

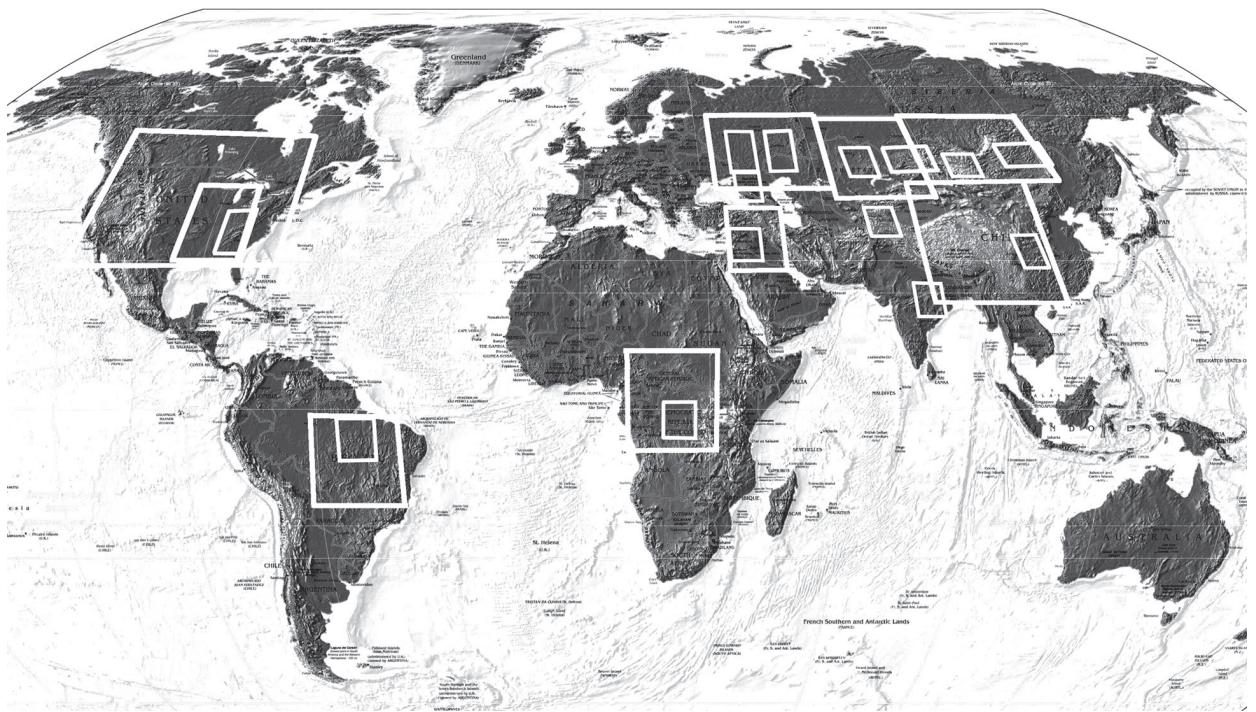


Рис. 1. Расположение исследованных областей

Результаты

Основной результат состоит в том, что есть масштабы, при переходе к которым рисунок рельефа (и его среднее направление) меняется существенно чаще, чем в среднем. В чем это проявляется?

Если собрать в единую гистограмму масштабы скачков для всех территорий, то увидим явные пики. На *рис. 2* левая кривая – это общая гистограмма для всех малых областей, а правая кривая – для всех больших (в их общем диапазоне масштабов). Чтобы данные не учитывались дважды, в гистограмму не включены данные по США, так как области США и Мемфис перекрываются. На этом и на всех последующих графиках гистограмм по оси абсцисс отложены масштабы (логарифмическая шкала), а по оси ординат – частота скачков при данном масштабе (относительная величина).

Видим, что, даже собрав вместе столь различные территории, получаем явные пики в гистограммах. Для малых областей они расположены около масштабов 5 и 20 (далее будем обозначать как OM_5 и OM_20 соответственно). Отметим, что пик OM_20 проявляется здесь на фоне «технологического роста». А вот у больших территорий диапазон масштабов в районе OM_20 не осложнен этим ростом, и пик проявляется гораздо отчетливее. К пику масштаба 64 у «больших» областей, нужно отнестись осторожнее. Дело в том, что в области Евфрат проявился колоссальный пик на этом масштабе, который обусловил и общий пик.

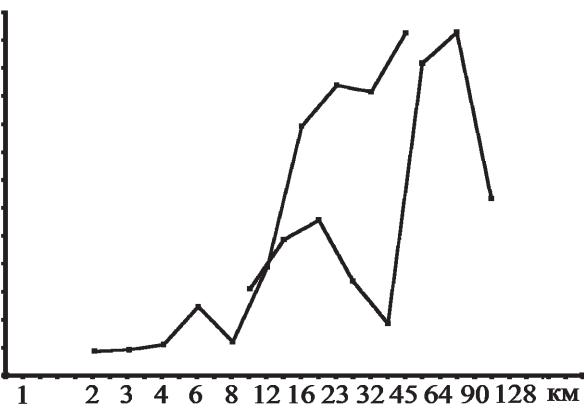


Рис. 2. Суммарная гистограмма скачков по всем малым областям (левая кривая) и по большим областям (правая кривая)



Рис. 3. Гистограмма скачков по области Татарии

Поэтому рассмотрим подробнее, как выглядят гистограммы на отдельных территориях, схожи ли они, как и какие пики там проявляются. Территории довольно большие и внутри них могут быть части с разным рисунком, которые в гистограмме взаимно маскируют свои особенности. Тем не менее в большинстве территорий особенности гистограмм довольно явные. Начнем с малых территорий. Оба пика проявились только в Татарии, *рис. 3*. Примеры яркого пика ОМ_5 – Воронеж и Мараба, *рис. 4*. Пик ОМ_20 ярко виден в областях Шилка, Салонга, *рис 5*, и на фоне «технологического роста» в Памире и Скифии, *рис 6*. В Алтае и Селенге видим только ступеньку на фоне, *рис. 9* – пиков нет, но в областях *рис. 9* отметим сильный рост на левом краю гистограммы, что, скорее всего, обусловлено ОМ, который не вошел в диапазон исследуемых масштабов. Отметим также, что в областях *рис. 8* и *9* рост гистограммы на правом краю превышает «технический» и также, возможно, обусловлен ОМ за правой границей использованного диапазона масштабов. Вернемся к этому ниже. Что же касается пиков в гистограммах больших областей, то они там обнаруживались везде и иногда сразу два.

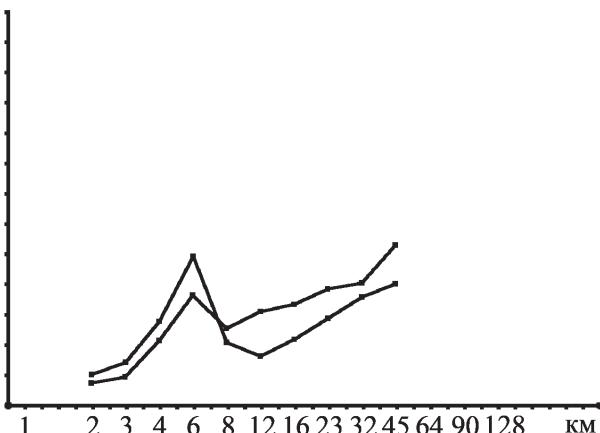


Рис. 4. Гистограмма скачков по областям Воронежа и Марабы

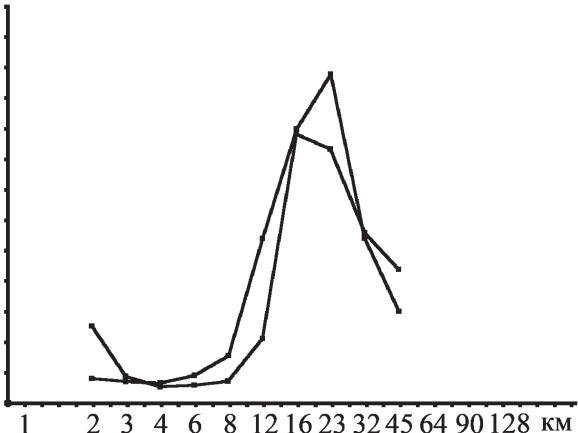


Рис. 5. Гистограмма скачков по областям Шилки и Салонги

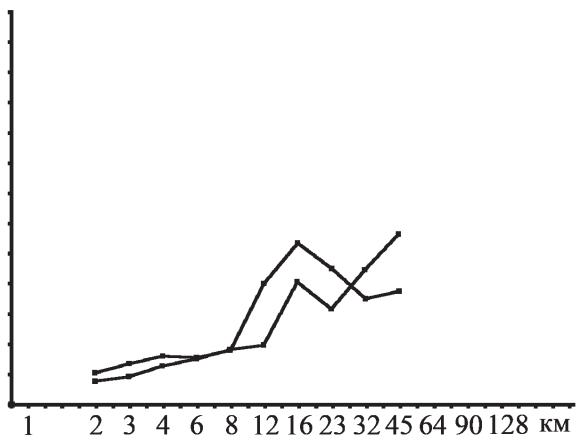


Рис. 6. Гистограмма скачков по областям Памира и Скифии

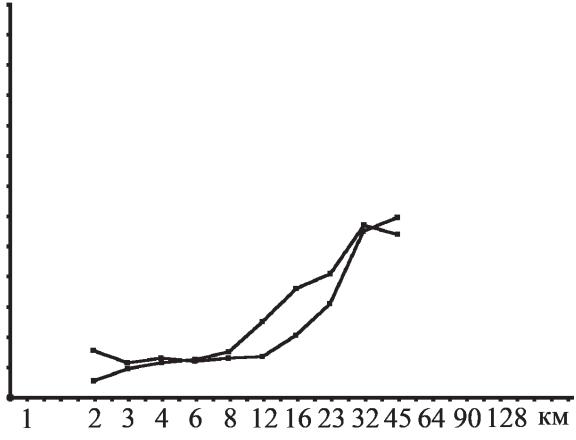


Рис. 7. Гистограмма скачков по областям Алтая и Селенги

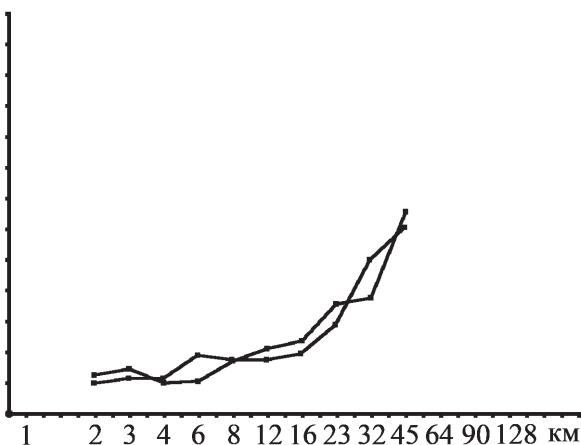


Рис. 8. Гистограмма скачков по областям Ганга и Караганды

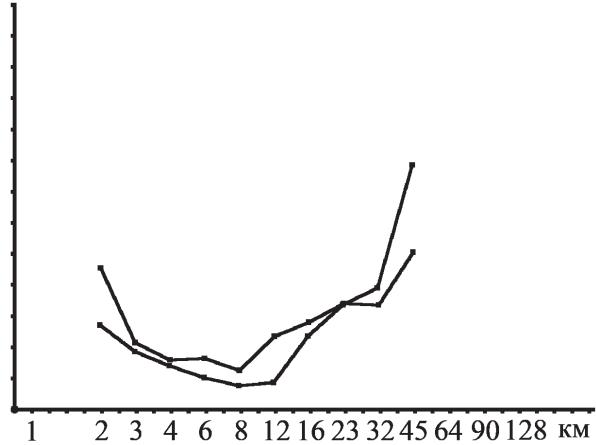


Рис. 9. Гистограмма скачков по областям ЭрРутбы и Янцзы

Посмотрим, как «индивидуальные» пики в конкретных областях соотносятся с пиками, найденными в обобщенных гистограммах. Для каждой области отметим масштабы явных пиков и построим гистограмму числа этих пиков для каждого масштаба (и у малых и у больших областей обнаружилось по 10 явных пиков).

Масштаб (км)	1	2	4	6	8	12	16	23	32	45	64	90	128	180
Число пиков в «малых»		1	1	2			3	2	1					
Число пиков в «больших»						1	2	2	2	1	1			1

Все пики малых областей с точностью до одного масштабного шага сосредоточены вокруг масштабов 4 и 23, и у больших также сгущение пиков около 23, что подтверждает оба эти ОМ. А вот у пика при масштабе 64 пока нет достаточного подтверждения.

Таким образом, пики у ОМ_5 и ОМ_20 проявляются как в отдельных областях, так и в суммарных гистограммах и не связаны с технологией расчета, так как проявляются при тех же значениях масштаба в разных местах последовательности анализа.

Для того чтобы изменить диапазон анализируемых масштабов, в данной технологии требуется соответственно изменить размер окна анализа и размер анализируемой территории (практически больше, чем на порядок по площади). А это приводит к тому, что, если есть пик в гистограмме, то в гистограмме охватывающей большой области этот пик вполне может не проявиться, его могут замаскировать особенности остальной, существенно большей части области. Однако нередко можно проследить особенности гистограммы меньшей области и в большей. Сопоставим гистограммы ЭрРутба (слева) и Евфрат (справа) на *рис 10*. Повышенный рост на правом краю в ЭрРутба, видимо, действительно обусловлен пиком, который уже вне диапазона масштабов «малой» области, но обнаружился в охватывающей области (Евфрат).

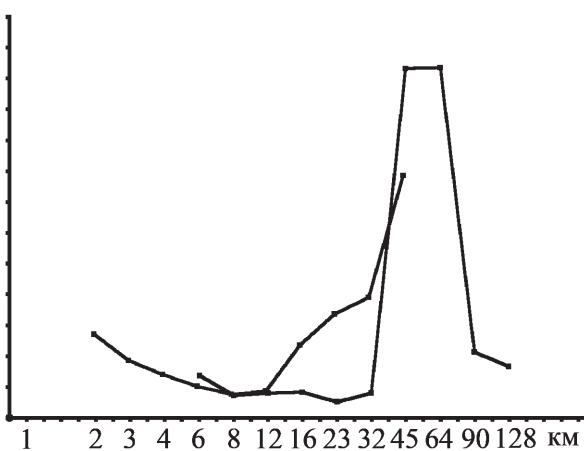


Рис. 10. Гистограмма скачков по областям ЭрРутбы (слева) и Евфрат (справа)

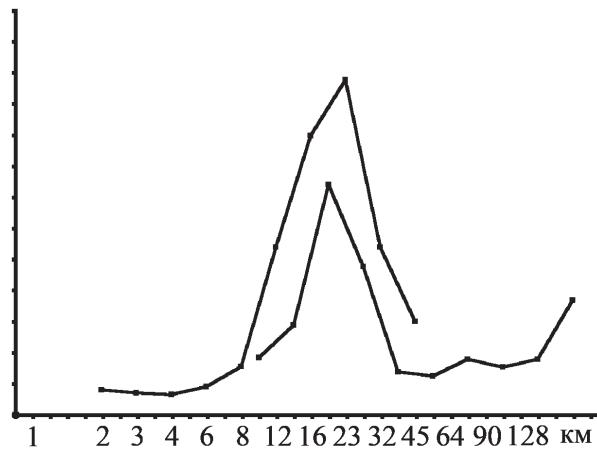


Рис. 11. Гистограмма скачков по областям Шилки (слева) и Байкала (справа)

А при целенаправленном выборе меньших областей обнаружить соответствие особенности текущей гистограммы и гистограммы фрагмента легче. Если в гистограмме большой области проявился пик при малом масштабе, то можно взять для более детального анализа тот фрагмент большой области, где скачки были именно при этом масштабе. Тогда и в гистограмме фрагмента (уже в другом диапазоне масштабов!) получаем пик для того же масштаба, пример на *рис. 11*, Шилка (слева) и Байкал (справа).

В целом можно сказать, что, если резкое изменение рельефа происходит чаще при каком-то масштабе, то это масштабы около OM_5 и OM_20. Хотя иногда более частые изменения могут вообще не наблюдаться. Более того, нередко среднее направление вообще не меняется существенно даже при изменении масштаба в 45 раз. На некоторых территориях направление не менялось существенно на 40% площади.

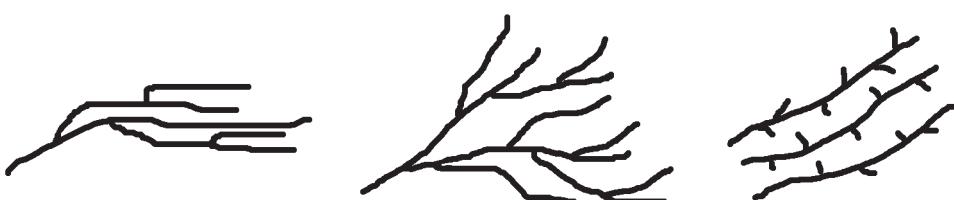


Рис. 12. Примеры рисунка гидросети

Почему это происходит? Не меняется рисунок? Но как это может быть, если при смене масштаба неизбежно переходим от рек к притокам, от хребта к отрогам? Дело в том, что, как отмечалось выше, изменение среднего направления свидетельствует о серьезных изменениях рисунка, а вот обратное неверно – рисунок может измениться существенно, но среднее направление меняется при этом мало. На *рис. 12* приведено несколько примеров такого рисунка гидросети, когда среднее направление не меняется:

- притоки параллельны основному руслу;
- направление притоков отличается, но не ортогонально и симметрично;
- притоки, ортогональны основному руслу, но их мало.

Заключение

Таким образом, расширенный анализ подтвердил, что при определенных масштабах гораздо чаще происходит резкое изменение рисунка рельефа. Причем это связано именно с конкретными масштабами, а не с положением в последовательности масштабов измерения (как «технологический рост»). На этих масштабах направление рельефа может и не изменяться, но если оно меняется, то чаще на одном из этих масштабов.

Далее нам нужно будет проверить, есть ли подобные «особые масштабы» при больших и меньших масштабах. Как отмечали ранее (Златопольский, 2012), можно ожидать, что ОМ различаются между собой примерно в 5 раз, если ориентироваться на различие найденных пиков и на наиболее частое различие между последовательными скачками в одном окне. Пока получены первые сведения о пиках при масштабе 1. А вот большие масштабы, возможно, потребуют изменений технологии (очень большие участки суши, проекционные искажения).

Важно понять, какие физические процессы порождают особые масштабы – возможно, сказываются тектодинамические системы разных рангов (Николаев, 1992), естественная кусковатость (Садовский, 1979) или свойства собственно гидросети (Хортон, 1948). Предположения об особых размерах и рангах высказывались неоднократно, и в данном случае можно проверить эти предположения достаточно объективной автоматической процедурой.

Интересно также рассмотреть, как связана форма гистограммы скачков со свойствами территории: почему так похожи гистограммы совершенно различных областей (Шилка и Салонга) и различаются соседние (Скифия и Воронеж, Байкал и Иртыш), хотя чаще у соседних участков близкие гистограммы.

Литература

1. 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.

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. Николаев П.Н. Методика тектоно-динамического анализа. М.: Недра, 1992. 293 с.
4. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т. 247. № 4. С. 829–831.
5. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии. М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948. 158 с.

**Multyscale Earth surface texture orientation analysis.
Special scales. Part two**

A.A. Zlatopolsky

*Space Research Institute of RAS
E-mail: aazlat@gmail.com*

New results in the investigation of the relief elements orientation statistical description for the elements of different size (scale) are presented. Our analysis show that there are «special scales». At passing to those scales relief elements orientation changes appreciably (jumps) more often then at the other scales. This situation is detected in different Earth regions and in all those regions in summary. Measures for objective results detection are described. Proper results interpretation is discussed.

Keywords: orientation characteristics, digital terrain map, multiscale analysis, special scales.