

Мульти масштабный анализ ориентации текстуры поверхности Земли. Особые масштабы

А.А. Златопольский

Институт космических исследований РАН
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32,
e-mail: aazlat@gmail.com

Работа посвящена исследованию ориентационных статистических характеристик элементов рельефа разного масштаба. Описана методика измерения и сравнения среднего направления элементов рельефа разного масштаба (размера), основанная на технологии LESSA. Приведены результаты анализа для широкого диапазона масштабов (отличие в десятки раз), для разных территорий. Обнаружены одни и те же особые масштабы (ОМ), при переходе к которым направление рельефа изменяется (скакком) особенно часто. На различных территориях суши и в существенно разных окнах анализа многократно подтверждено наличие двух особых масштабов. Получены статистические доводы в пользу того, что изменение направления рельефа чаще происходит при изменении масштаба примерно в 5 раз.

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

Вступление

Задача данной работы — исследовать, что происходит с ориентационными характеристиками рельефа при существенном изменении масштаба анализа, т. е. при изменении размера учитываемых элементов рельефа в десятки раз. Начнем с исследования того, что происходит при изменении масштаба со средним направлением элементов рельефа (хребтов, долин). В предыдущей работе (Златопольский, 2007) приведен пример того, как это направление изменилось на ортогональное при изменении масштаба в 5 раз. Нас будет интересовать более тщательный анализ: как происходит изменение этой величины, что происходит при больших изменениях масштаба, и есть ли общие закономерности на различных территориях.

С этой целью разработаны программы и технология анализа, сформирована методика измерения и оценена достоверность результатов. Рассмотрим эту методику и первые результаты экспериментов с цифровой моделью рельефа (ЦМР) по данным SRTM.

Технология анализа

Среднее направление рельефа будем оценивать через направление вытянутости розы-диаграммы. Быстро и объективно измерить эту характеристику позволяет технология LESSA (Златопольский, 1991), в которой выявляются линии долин и хребтов (будем называть их штрихами):

- строится роза-диаграмма штрихов,
- определяется величина и направление вытянутости розы-диаграммы.

Многолетнее использование показало объективность получаемой таким образом характеристики.

1. Принципиально разные способы построения розы — по направлению градиентов, по пространственным гармоникам, по штрихам — дают, в целом схожие розы, и очень близкое направление вытянутости, а значит, получаемый результат не зависит от процесса измерения (Златопольский, 1991). Последний вариант (направление штрихов) лучше отражает локальные особенности территории.

2. Нет систематической ошибки измерения направления, которая возможна в коротких линиях из-за неизотропности растра (Златопольский, 2007).
3. Близкие результаты могут быть получены при анализе и цифровой модели рельефа, и схем ручного дешифрирования соответствующего масштаба, и изображения (когда нет систематических ошибок из-за направления освещения, облаков и т. п.) (Златопольский, 2011).

С помощью описанной процедуры измеряется направление вытянутости штрихов. При переходе к более детальному масштабу выявляются многочисленные более мелкие объекты, свойства которых в статистике перекрывают свойства более крупных. Для наглядности масштаб определяется через размер структур рельефа, M (в км), которые выявляются преимущественно и формируют розу. Это ориентировочная величина, т. е. практически будут выявляться и несколько более мелкие и более крупные объекты. Масштаб меняем с постоянным логарифмическим шагом, M -шаг.

Пример на рис. 1 — это ЦМР в окне $468,72 \times 468,72$ км к западу от Байкала (1440×1440 пикселов, $0,3255$ км/пиксел, $49,2 \dots 55,2^\circ$ с.ш., $97,17 \dots 104,4^\circ$ в.д.). Измерения проводились для 12 значений M , от 5 до 221 км, с M -шагом = $\text{sqrt}(2)$ (т. е. размер структур меняется в 2 раза за 2 шага). Пример штрихов масштаба 55 и 156 приведен на рис. 2а, б. Розы, рассчитанные для этой территории, и их среднее направление вытянутости — на рис. 3. Направление измеряется в градусах, против часовой стрелки, начиная с востока. Направление для разных масштабов представлено ниже в тексте и графиком на рис. 4.

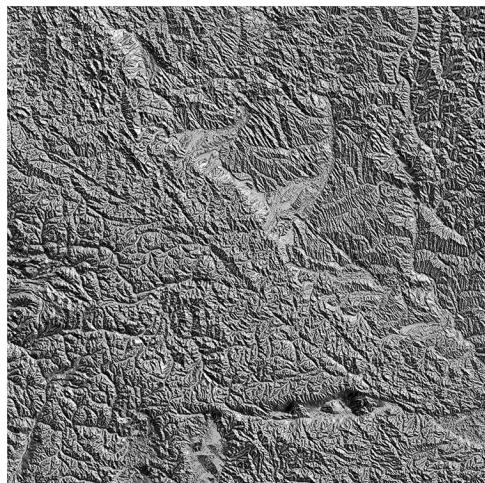


Рис. 1. Фрагмент ЦМР $468,72 \times 468,72$ км у западной оконечности Байкала (ниже — темнее)

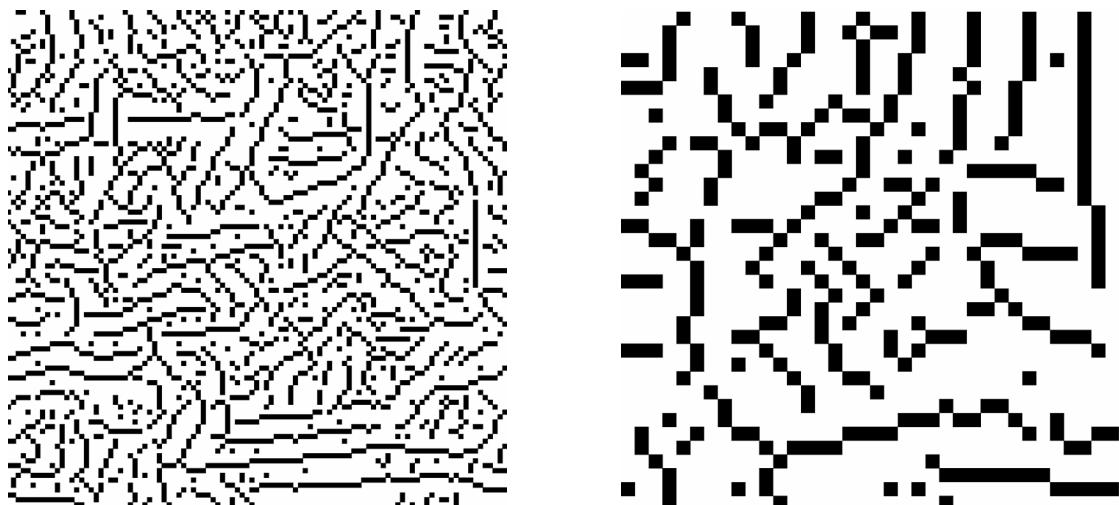


Рис. 2. Штрихи фрагмента, масштаба 55 км (а) и 156 км (б)

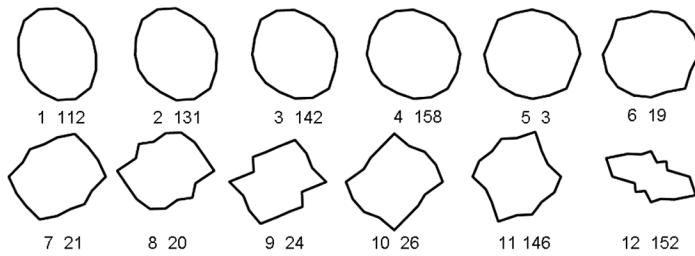


Рис. 3. Розы фрагмента и их среднее направление для штрихов 12 масштабов

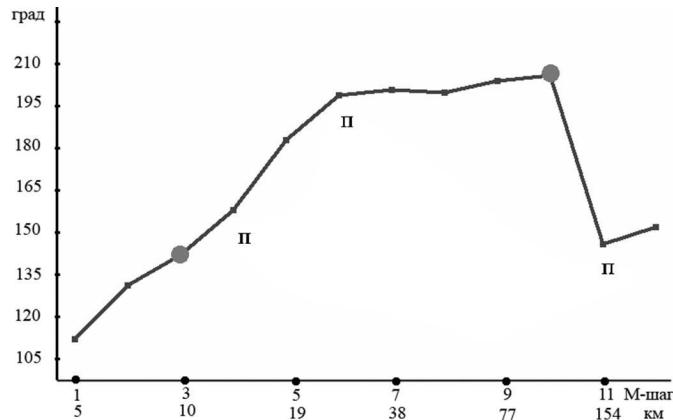


Рис. 4. График среднего направления роз фрагмента для штрихов 12 масштабов

Номер шага	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Масштаб (км)	5	7	10	14	20	28	40	55	78	110	156	221
Направление вытянутости (град)	112	131	142	158	3	19	21	20	24	26	146	152
Скачки	\-----/-\-----/\-----/-\-----/											
Величина вытянутости	4	4	3	5	4	11	16	28	23	5	34	59
Порог вытянутости	4	4	4	3	4	6	8	9	12	14	15	21

Максимальное изменение направления вытянутости в этом примере $V = 89^\circ$, от 21 до 112° .

Если **роза-диаграмма близка к кругу или к кресту**, то результат измерения направления вытянутости не надежен, и розу нужно исключить из анализа. Такую ситуацию можно обнаружить по малой величине вытянутости. Однако абсолютная величина вытянутости не может использоваться в качестве порога, так как принципиально различается ситуация у роз с малым и очень большим числом штрихов — когда штрихов на порядки больше, то даже небольшая вытянутость серьезно подтверждена статистически. Найден и использован алгоритм определения адаптивного порога для большой территории по процентилям вытянутости. Оказалось, что пороги, получаемые для разных территорий очень сходны для окон одного размера (в пикселях), D , и хорошо описываются формулой $106/\sqrt{D}$. В примере на рис. 4 по этому критерию не учитываются розы на 3-м и 10-м шаге (круглая метка на графике), хотя направление этих роз и не выпадает из общей последовательности.

Скачок. Рассмотрим, между какими значениями масштаба направление текстуры меняется существенно, скачком, т. е. больше чем на пороговую величину (в этом примере порог 40°). Скачек мы ищем от меньшего масштаба к большему (слева направо на графике), и в случае «плато» получаем его «левый» край. Скачок может произойти за один или за несколько М-шагов. Возможны перекрывающиеся пары масштабов с разницей направления больше порога. Сформулировано правило выбора одной из таких пар. На рис. 4 найдено три скачка (метка «п» на графике): один за 3 М-шага, два за 2 М-шага. Необходимо вы-

брать, что именно нас интересует — ПРИ каком масштабе происходит переход к новому направлению («конец скачка») или ПОСЛЕ какого масштаба происходит переход к новому направлению («начало скачка»). Сейчас расчет идет по первому варианту и скачки отнесены к шагам 4, 6 и 11.

Основные параметры анализа

Алгоритмические решения. Чтобы не вносить искажений отбором штрихов, сохраняем все — и долины, и хребты, и мелкие, и извилистые.

Поиск штрихов в LESSA основан на линейных операциях, поэтому вместо поиска штрихов большего размера можно проводить тот же поиск, но на сжатом ЦМР. Результат не точно эквивалентен в деталях формы штриха, в точном положении штриха, в форме окна расчета роз (при сжатии все грубее) и в генерализации результатов самых мелких масштабов, но все это не оказывается на основных статистических результатах.

Диапазон масштабов анализа ограничен «статистическими соображениями», а его абсолютная величина определяется размером окна анализа, D. Масштаб не может быть слишком грубым, так как в окне окажется слишком мало данных для надежной оценки направления, ориентировочно, $M < D/2$. Отметим, что в таком окне будет только несколько штрихов (< 20), и отдельные штрихи могут легко изменить розу, а значит и роза и направление ее вытянутости могут легко измениться в соседних окнах или при близких масштабах.

Масштаб не может быть и излишне детальным — если данных слишком много, то практически исчезает вытянутость, $M > D/100$. В этом окне уже десятки тысяч штрихов, которые подавляют локальные особенности, уменьшают возможность смены направления у последовательных масштабов.

В итоге, нет смысла изменять масштаб больше, чем в 50 раз. Например, в окне 100 км можно анализировать структуры от 1 до 50 км.

M-шаг = $\sqrt{2}$. Судя по экспериментам, нет нужды в большем или меньшем шаге. Если ожидать существенное изменения направления при 5-кратном изменении масштаба, то это будет 5 M-шагов. Изменение в 45 раз — это 12 M-шагов.

Размер окна, D. Ключевой параметр, выбор которого, как мы видели, фактически определяет и максимальные анализируемые структуры, и реальный диапазон масштаба, а кроме того и минимальный размер области анализа, в которой должно быть достаточно не перекрывающихся окон.

Рабочие параметры анализа

Порог скачка. При росте этого порога теряем скачки, а при его уменьшении одно постепенное изменение направления разбивается на несколько скачков. Эксперименты показали, что при варьировании этого порога, число скачков меняется плавно (примерно на 11 % на 5 отсчетов порога) без ожидаемого резкого изменения около значения 45, и статистическая картина результата в целом не меняется, т. е. выбор этого порога не критичен для картины в целом. Использовано значение 40.

Фильтрация не вытянутых роз. Пороги «вытянутости» и «число не вытянутых». Описанная выше фильтрация не вытянутых роз необходима для того, чтобы случайный результат измерения направления не создавал ложные скачки, искажающие статистику — случайный результат измерения приводит к ложному скачку за один M-шаг, а после следующего M-шага скачек назад к реальному значению. Возможна и ситуация перехода от одного направлению к другому, когда при промежуточных масштабах присутствует смесь

двух направлений, и роза оказывается с неопределенной вытянутостью. Поэтому анализируем последовательность роз, пропуская не вытянутые. Но число пропущенных роз в одной последовательности не должно быть слишком велико — задается порог. Рассматривались значения этого порога от 0 до половины роз в последовательности. Получается пара порогов («порог на величину вытянутости» и «порог на число не вытянутых»). Эксперименты показали, что

- при ужесточении условий (повышение первого порога и понижение второго) удаляется много окон анализа (до половины при порогах 10,0);
- на статистический результат влияет не соотношение этих порогов, а число отброшенных окон, например, близки результаты при порогах 10,1 и 20,3;
- достаточно задавать не особенно жесткие условия, так как ужесточение практически не меняет статистическую картину, но существенно уменьшает число анализируемых последовательностей. Для 12 М-шагов использована пара порогов 10,4.

Область анализа

Для получения статистически значимых результатов нужно исследовать область, в которой окажется достаточно не перекрывающихся окон анализа. В принципе, можно аккумулировать данные по окнам из разных областей, но пока рассматриваем результат по одной области. Будем ориентироваться на наличие 100 слабо перекрывающихся окон, т. е. желательна площадь области больше $30 \times D \times D$. Однако размер области ограничен размером участков суши с выраженным рельефом, проекционными искажениями и т. д.

Для данного исследования важно в проекции сохранять размер структур и их направление, поэтому мы работаем с данными в проекции UTM. Географические координаты областей приводятся для ориентировки, приблизительно.

Пример на рис. 5 — это ЦМР области вокруг Байкала, 2921×1840 км (8973×5651 пикселов, 0,3255 км/пиксель, $45\dots60^\circ$ с.ш. и $85\dots122^\circ$ в.д.). На рис. 6. приведены результаты анализа происходящего в окне (диаметр 468,72 км) вокруг каждой точки данной территории при смене масштабов. Масштаб изменялся в 45 раз от 5 до 225 км, за $N = 12$ шагов. Белым отмечены участки, где нет результатов анализ — нет данных (Байкал и отсутствие данных выше 60-й параллели), или нет вытянутых роз.

На рис. 6а показана величина изменения среднего направления, V , при указанном изменении масштаба. Чем меньше V , тем темнее рисунок. Для сопоставления визуализировано направление вытянутости при минимальном и максимальном масштабе, рис. 6б, черные и красные линии соответственно. В большей части территории направление изменилось на ортогональное (на половине территории изменение $V > 80^\circ$). Но есть и области, где направление практически сохранилось на всех масштабах (на 15 % территории $V < 30$). На рис. 7а показано, при каких значениях масштаба изменение происходит «скачком» в первый раз. Там, где направление меняется мало, скачков совсем нет. Отметим, что многие скачки происходят при одном или близких значениях масштаба (одинаковая яркость). На рис. 7б показаны масштабы повторного скачка в тех же окнах. Вторые скачки происходят гораздо реже и возможны лишь в тех окнах, где первый скачок произошел при малых значениях масштаба.

Графики скачков

Перейдем от распределения скачков по территории к их распределению по масштабам. Естественно ожидать, что они происходят одинаково часто при всех масштабах. На рис. 8 (темно-зеленая линия) показано относительное число скачков на 10-ти масштабных шагах

из 12-ти. Скачок, как мы видели выше, может происходить за один или несколько шагов. Здесь учитываются только самые «резкие» скачки — за 1 или 2 М-шага, которые отражают ситуацию в целом: такие скачки могут присутствовать почти во всем диапазоне масштабов ($N - k$ масштабов, где k — шаг скачка) и их достаточно много (обычно они составляют больше половины от всех скачков).

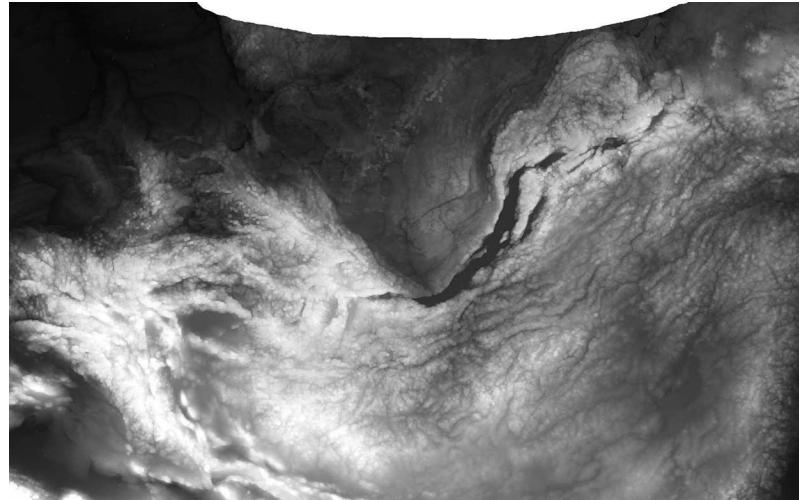


Рис. 5. Изображение ЦМР области «Байкал» (ниже — темнее)

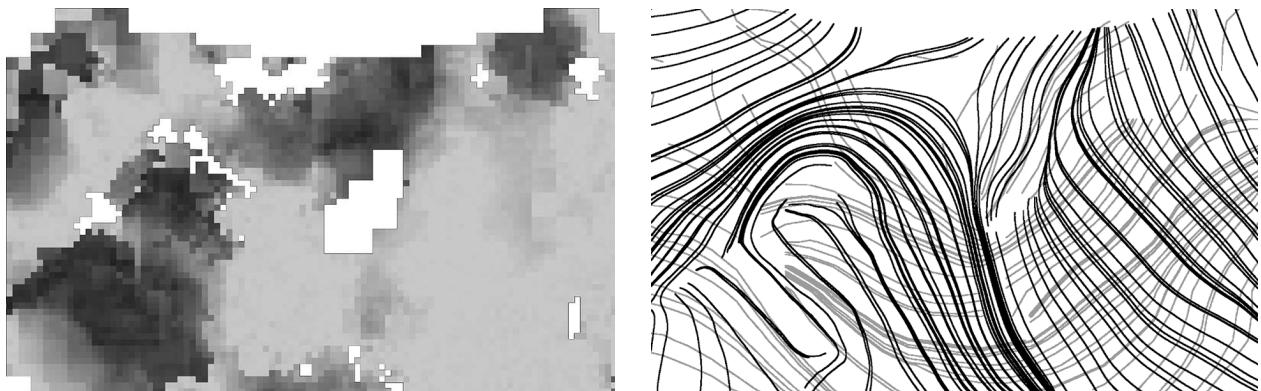


Рис. 6. Для области «Байкал»:

- а* — величина максимального изменения среднего направления в скользящем окне (меньше — темнее);
- б* — линии направления вытянутости роз для штрихов масштаба минимального (черные) и максимального (серые)

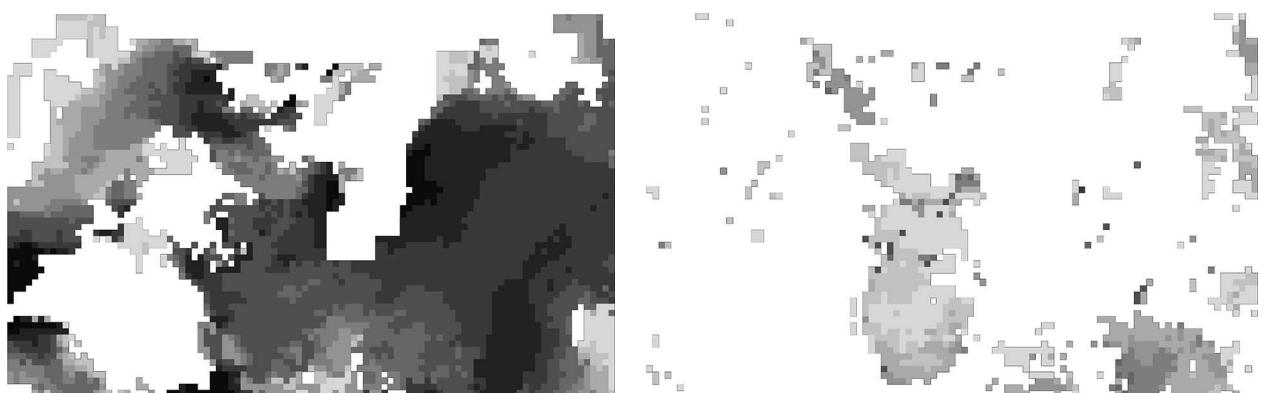


Рис. 7. Для области «Байкал» номер масштаба первого (а) и второго (б) «скачка»,
темнее — номер меньше, белый — нет скачка

Распределение скачков в данном примере далеко от равномерного, с явным максимумом. Для того чтобы оценить, на сколько можно доверять этому результату, на сколько он устой-

чив, на сколько зависит от параметров анализа и выбора исходных данных, сравним его с результатами других расчетов по этой же области, но с окном в 3 раза меньше (166,66 км, масштабы от 5 до 80 км, 9 шагов), (желтая линия):

- по части области (см. ниже «Шилка») с окном 93,76 км, (светло-зеленая линия);
- по той же части области, но исходные данные получены совершенно иным путем — не SRTM, а ASTER (сиреневая линия).

Как мы видим, основная особенность измерений на данной территории — пик скачков при переходе к масштабу 20 км — отчетливо сохраняется. Эта согласованность результатов позволяет рассчитывать, что предложенная методика дает объективное описание этого мультимасштабного свойства ориентации рельефа.

Такая же ситуация — «особый масштаб», при котором скачки происходят гораздо чаще, чем при других масштабах — встретилась на самых разных территориях. Экстремумы отмечаются при масштабе 20 и 4 км (± 1 M-шаг). Будем сокращенно называть эти особые масштабы OM_4 и OM_20. Сравним несколько таких примеров (Мараба, Бразилия — красная линия, Татария — синяя линия) с двумя результатами по «Байкалу» (рис. 9).

Сходные результаты с экстремумами на «особых масштабах» получены и на других исследованных территориях. Использованы цифровые модели рельефа SRTM с разрешением 0,0625 км/пиксел, во всех случаях было 12 измерений. Основная группа территорий исследовалась в диапазоне масштабов от 1 до 45 км. При этом интервал масштабов, в котором могут быть обнаружены экстремумы (диапазон поиска экстремумов, ДПЭ) составляет от 2,76 до 31 км, а значит, могут быть обнаружены экстремумы OM_4 и OM_20. Использовано окно анализа 93,76 км. Для каждой области приводится характерное географическое название, ее размеры и примерные географические координаты.

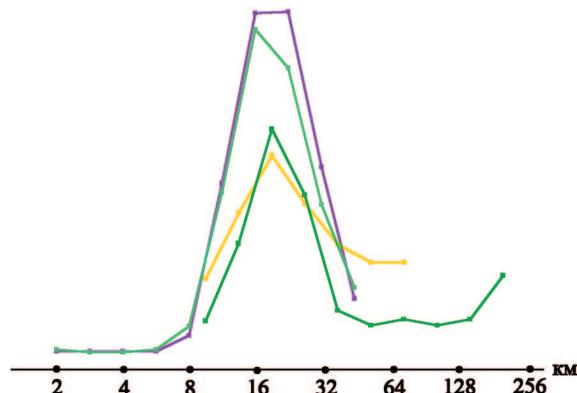


Рис. 8. Гистограммы скачков для области «Байкал»: расчет в окне 470 км — темно-зеленая линия; расчет в окне 167 км — желтая линия; для области «Шилка» по данным SRTM — светло-зеленая линия; для области «Шилка» по данным ASTER — сиреневая линия

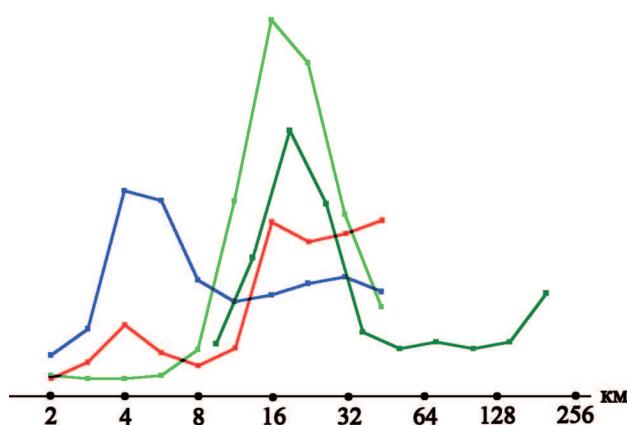


Рис. 9. Гистограмма скачков для областей «Байкал» — темно-зеленая линия; «Шилка» — светло-зеленая линия; «Мараба» — красная линия, «Татария» — синяя линия

Воронеж	581,67×952,54 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.
Алтай	676×644,8 км	10384×9905 пикселов	48...53° с.ш., 83...92° в.д.
Шилка	651×651 км	10000×10000 пикселов	48...56° с.ш., 111...123° в.д.
Салонга	668×664 км	10260×10200 пикселов	4° ю.ш. – 2° с.ш., 18...24° в.д.
Атланта	571,3×685,7 км	8775×10533 пикселов	32...38° с.ш., 81...87° з.д.
Мараба	667×775 км	10246×11908 пикселов	2...11° ю.ш. 47...55° з.д.

Для областей такого размера можно ожидать, что проекционные искажения величины и направления структур рельефа не велики. 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, рассмотрим и области, которые охватывают перечисленные и существенно (в 3...6 раз) больше, чем они. Это нужно для того, чтобы

- оценить насколько сохраняются особенности мультимасштабного «поведения» направления рельефа, если окно анализа изменить существенно;
- искать ОМ больших масштабов.

Эту группу областей будем называть «большими», а предыдущую — «малыми». Для больших областей окна анализа, а значит, и диапазон масштабов будут различны.

Волга	2130×1762 км, 6544×5416 пикселов	44...60° с.ш., 32...63° в.д., окно 469 км, масштаб от 4,9 до 220 км	ДПЭ 14...155 км	Включает «Воронеж» и «Татарию»
Байкал	2921×1840 км, 8973×5651 пикселов	45...60° с.ш., 85...122° в.д., окно 469 км, масштаб от 4,9 до 220 км	ДПЭ 14...155 км	Включает «Шилку»
Амазонка	2235×2252 км, 10299×10378 пикселов	22...2° ю.ш., 42...62° з.д., окно 313 км, масштаб от 3,3 до 146 км	ДПЭ 9...104 км	Включает «Мараба»
Конго	2091×2139 км, 9131×9341 пикселов	10° ю.ш. – 9° с.ш., 13...32° в.д., окно 330 км, масштаб от 3,5 до 155 км	ДПЭ 10...109 км	Включает «Салонга»
Мемфис	1921,3×1600 км, 11809×9831 пикселов	30...42° с.ш., 81...100° з.д., окно 234 км, масштаб от 2,4 до 110 км	ДПЭ 7...78 км	Включает «Атланту»
США	4151×3080 км, 10223×7587 пикселов	29...57° с.ш., 75...125° з.д., окно 585 км, масштаб от 6 до 274 км	ДПЭ 17...194 км	Включает «Мемфис» и «Атланту»

Масштаб изменяется в указанных диапазонах, в скользящем окне ищется скачок направления элементов рельефа, и строятся гистограммы скачков. Для того чтобы гистограммы была достаточно представительными, число не перекрывающихся (или почти не перекрывающихся) окон должно быть существенно, скажем, на порядок, больше чем число отсчетов в гистограмме. Это условие выполняется для всех случаев, и только в «Волге» и «Байкале» окон несколько меньше.

Гистограмма скачков

Рассмотрим результаты анализа, начиная с самые общих, сводных данных. Оказалось, что скачек направления происходит не во всех окнах. У малых областей такие ситуации редки, около 10 % (4...23 %), а у больших — в 2 раза чаще, около 25 % (21...40%). Возможно,

сказываются проекционные искажения, которые растут с увеличением анализируемой области. Действительно, наибольший процент таких окон у самой большой области (США), а минимальный — у малых. У 70 % малых областей таких окон не больше 10 %, хотя в нескольких случаях (Татария, Алтай) их много.

В части окон скачек направления происходит не один раз. Среди окон, в которых есть существенные изменения, повторные скачки происходят только примерно в трети случаев (13...36 % у больших и 18...50 % у малых).

Не смотря на проекционные искажения из-за увеличения областей расчета (в 5 раз), сохраняется преемственность результатов. Прямую стыковку гистограмм вложенных областей ожидать сложно — фактически существенно различается анализируемая территория, — но иногда стыковка довольно хорошая (рис. 10).

Перейдем к поиску ОМ. Проявление ОМ_4 можно ожидать только в «малых» областях, ОМ_20 — везде, а возможного ОМ_100 — в 5 «больших», но в 2-х из них на самом краю диапазона.

Пик ОМ_20 есть во всех 12 областях, кроме «США», где и искажения наибольшие, и ОМ_20 на самом краю диапазона. Пик обнаруживается при масштабах 16...32 км (17...29 у малых и 16...32 у больших), т. е. в диапазоне ± 1 М-шаг от масштаба 22,6 км.

Пик ОМ_4 проявился в 70 % малых областей при масштабах 3...6 км, т. е. также ± 1 М-шаг от масштаба 4,24 км.

Пока мы интегрировали статистику скачков для той или иной территории. Но, если предположить, что значение ОМ примерно постоянно для всей (или большей части) поверхности суши, то можно объединить данные, полученные для разных территорий. На рис. 11 приведена суммарная гистограмма скачков для малых областей, в которой отчетливо проявляется ОМ_20, при масштабе примерно 16 км, и ОМ_4 при масштабе 5 км. Там же приведена суммарная гистограмма скачков для общей части масштабных диапазонов больших областей (ДПЭ 13,5...108). В ней также отчетливо проявляется ОМ_20, при масштабе примерно 19 км.

Таким образом, подтверждено существование двух ОМ и для совершенно разных территорий, и интегрально, и для окон, отличающихся по площади в десятки раз.

Если оценивать штрихи «на глаз», то изменение масштаба в 5 раз приводит к переходу от измерения направления реки к измерению направления притоков (и от хребта к отрогам). Величины ОМ_4 и ОМ_20...4,2 и 23 км соответственно также отличаются на близкую величину — 5,5. Но ожидаемые два пика (ОМ) в одной гистограмме малых областей было только в 2-х случаях из 7-ми (расстояние между пиками в Татарии 4,5 раза и в Мараба 5,8 раз, т. е. в среднем 5,1).

Если ожидать следующий ОМ через такой же масштабный интервал, 5,5 раза, то мы могли бы увидеть его при масштабе около 126 км, скажем от 90 до 180 км. Эти значения входят в диапазон масштабов областей «Волга», «Байкал» и «США», но только в областях «Волга» и «США» есть слабые экстремумы при этих масштабах. Чем можно объяснить то, что ОМ_100 проявляется гораздо хуже, чем ОМ_20? Возможно, на больших структурах, сильнее сказывается проекционное искажение. Или мы просто не достигли пика ОМ_100, у которого несколько большее значение. С другой стороны, мы ищем на правом краю диапазона, где в большинстве случаев происходит монотонный рост числа скачков, но нет экстремума (например, гистограмма Амазонки на рис. 10). Может у этого роста «технологическая» причина, и он «экранирует» искомый экстремум. Как отмечалось выше, разом больших структур легче измениться при небольшом изменении масштаба или положения окна, а значит больше возможность скачков. Еще одна возможность роста — более грубый (пространственно) расчет направлений при самых больших масштабах диапазона, с резким переходом от значения к значению, а вблизи этого перехода могут появиться ложные скачки между значениями для крупных и мелких структур.

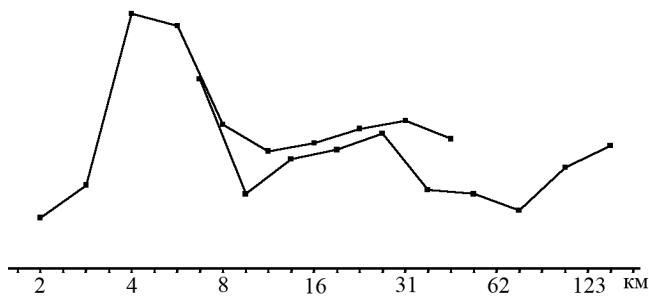


Рис. 10. Гистограммы скачков для областей «Мараба» (слева) и «Амазонка» (справа)

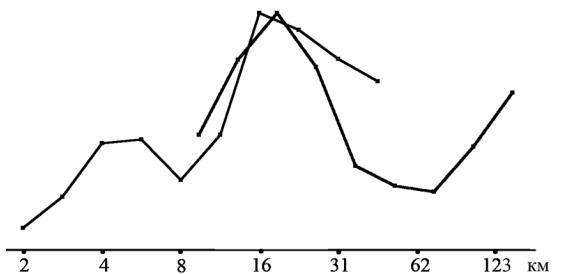


Рис. 11. Суммарные гистограммы скачков для 7 «малых» областей (слева) и 4 «больших» областей (справа). Для 5 «больших» областей кривая та же, но общий диапазон масштабов меньше

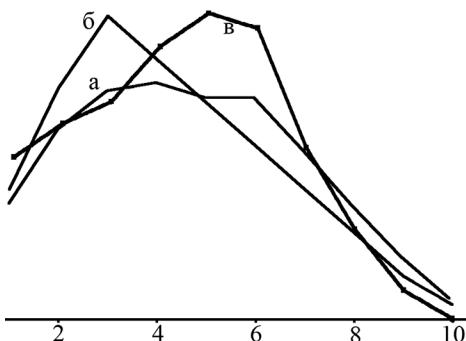


Рис. 12. Гистограмма расстояний:
а и б — расчетные комбинаторные;
в — суммарная гистограмма измерения для всех областей

Для поиска следующего по величине ОМ_700 нужно измерять структуры размера Главного Кавказского хребта, работа очень громоздкая. Для нее нужны слишком большие области поиска около $16\ 000 \times 16\ 000$ км, которые сложно найти, да и проекционные искажения будут очень большие. Единственная возможность — исследовать в этом диапазоне масштабов десятки отдельных областей примерно по 2300×2300 км.

Можно продолжить поиск ОМ и в области малых масштабов, ОМ_1 (примерно 0,75 км), работая со структурами от 0,25 км (разрешение ЦМР 12...15 м/пиксел). Тут возникает другой методический вопрос — каковы минимальные размеры элементов рельефа пригодных для анализа.

Гистограмма расстояний между скачками

Как отмечалось, повторные скачки в окне происходят не часто, но все-таки происходят. И, если ОМ существуют и отличаются примерно в 5,5 раза, то между первым и вторым скачком может быть преимущественно именно такая разница масштабов, 5 принятых в этом исследовании М-шагов. В тех окнах, где происходит больше одного скачка, определим «масштабное

расстояние» между первым и вторым скачком, т. е. число M -шагов между ними. Далее строим гистограмму этих значений, и смотрим, есть ли какое-то преимущественное расстояние.

В 12-ти из 13-ти территорий в гистограмме оказался пик для расстояния в 5...6 шагов. В 5 случаях в гистограммах есть и другой максимум, и в 2-х из них он больше, чем при значении 5, и находится на расстоянии 1. Таким образом, во всех примерах, включая большие, где не найден второй экстремум (ОМ_100), второй скачок чаще происходит именно через 5 шагов после первого. Пик для расстояния 5 проявляется и в интегральной гистограмме по всем 13 примерам, рис 12в.

Отметим проблемы построения и анализа гистограммы расстояния. При измерении расстояния шум оказывается сильнее, так как выборка меньше, а сама величина — это разница измерений. Одно из проявлений шума — экстремум на расстоянии 1, который порождается, в частности тем, что изменение направления на ортогональное за 2 шага может дать 2 скачка с расстоянием в 1 шаг (скажем, направление меняется на 41° на 1-м шаге и 44° на 2-м при пороге скачка в 40°). Поэтому данный расчет проводился с порогом скачка 47. Изменение этого порога, скажем до величины 40, может существенно сказаться на гистограмме расстояния и практически не сказывается на гистограмме скачков. При переходе от 40 к 47, число скачков уменьшается примерно на 13 %, а число повторных скачков — примерно на 40 %. Другой источник пика на расстоянии 1 — не достаточно отфильтрованные розы близкие к кругу. Такая роза может дать случайное изменение направление и 2 скачка через 1 шаг (к случайному направлению и от него). Еще одна возможная коррекция — удалить из расчета вторые скачки, которые не поддержаны соседними, перекрывающимися окнами, и поэтому, вероятно, случайны (например, их могут порождать упомянутые выше грубые измерения направления при больших масштабах). Обе эти коррекции уменьшают число скачков через 1 шаг и немного смещают максимум в гистограммах в сторону больших расстояний, но существенно уменьшили бы число измерений.

Другая проблема состоит в том, что гистограмма расстояний при равной вероятности скачков не равномерна, имеет максимум. Дело в том, что скачок направления происходит в некотором интервале масштабов (за несколько, M -шагов) и, по алгоритму измерения, диапазоны последовательных скачков не могут перекрываться. Если второй скачок произошел за k шагов, то он может произойти на расстоянии не меньше k шагов, от первого. Если учесть это условие, то комбинаторное число возможных пар скачков для разных расстояний различно, и при измерениях в последовательности 12 масштабов, получается больше пар на расстоянии 3...6 (рис. 12а). Однако практически скачки не равновероятны, скачков с большим k почти нет — обычно за 1...3 шага происходит 75 % скачков (и еще 10 % при $k = 4$). Если в комбинаторном расчете предположить, что возможны скачки только за 1...3 шага, то фоновый максимум пар будет при расстоянии 3 (рис. 12б). А значит, если мы получаем максимум гистограммы на расстоянии 5...6 (рис. 12в), то это уже не фоновый экстремум, хотя и не столь далек от него.

Таким образом, гистограмма расстояний показывает, что второй скачок чаще происходит через 5 M -шагов после первого.

Заключение

Подытожим результаты первых шагов мультимасштабного анализа направления текстуры рельефа.

Разработаны алгоритм и рабочий аппарат анализа.

Найдены условия, параметры и диапазон исследования. Судя по приведенным экспериментам, результаты, в целом, устойчивы к изменению параметров анализа и исходных данных. Выбранные алгоритмические решения и параметры расчетов сказываются на результатах, но основные выводы сохраняются и при их существенном изменении (порогов скачка, минимальной вытянутости, числа не вытянутых и др.).

Изменение среднего направления при изменении масштаба в 45 раз, чаще всего, очень велико (ортогонально), но происходит не везде. А повторное изменение — только в трети окон.

Получено некоторое подтверждение того, что повторное изменение направления происходит чаще всего при изменении масштаба примерно в 5 раз.

Есть особые масштабы, при которых изменение направления скачком происходят заметно чаще, чем при других. Такие особые масштабы (ОМ) найдены около 4 и 20 км.

Особые масштабы проявились во всех примерах, кроме случая с максимальными проекционными искажениями. В различных территориях и в разном диапазоне масштабов (для ОМ_20) получены максимально близкие значения (± 1 шаг расчета). ОМ_20 проявляется практически везде, а ОМ_4 в большинстве (75 %) примеров. Столь же ярко эти ОМ проявляются и в интегральных расчетах, по всем территориям.

Возможно, есть и другие особые масштабы, которые отличаются друг от друга примерно в 5 раз. Это один из вопросов, который хотелось бы исследовать в дальнейшем. А кроме того планируется

- сравнить мультимасштабные свойства рельефа и изображения;
- сопоставить геологические свойства территории с мультимасштабными свойствами их рельефа;
- исследовать, можно ли разный масштаб анализа сопоставить со структурами разной глубины или с геологическими событиями разного возраста.

Литература

1. Златопольский А.А. Ориентационно-текстурная характеристика аэрокосмических изображений // Цифровая обработка видеинформации при структурно-геологических и сейсмотектонических исследованиях. Л.: ВСЕГЕИ, 1991. С. 4–31.
2. Златопольский А.А. Особенности определения направления естественных объектов и текстур по растровым дистанционным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 1. С. 52–56.
3. 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.

Multyscale Earth surface texture orientation analysis. Special scales

A.A. Zlatopolsky

Space Research Institute,
117997, Moscow, Profsoyuznaya, 84/32,
e-mail: aazlat@gmail.com

Investigation of the relief elements orientation statistical description for the elements of different size (scale) is presented. Methodology of the mean relief elements orientation measurement and comparison based on the LESSA technology is described. Analysis results for wide range of scales (50 times) and for different territory is presented. In the different parts of the land and in the analysis windows of considerably different size the same special scales are detected. At passing to those scales relief elements orientation changes appreciably (jumps) more often than at the other scales. Two special scales are confirmed repeatedly. Statistical proof is found for the supposition that orientation jumps are more often if scale changes in 5 times.

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