

## Порядковая статистика долин: длина, ширина, направление (на примере Буреинского хребта)

А. А. Златопольский<sup>1</sup>, Д. А. Симонов<sup>2</sup>, В. С. Захаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, 117997, Москва, Россия  
E-mail: aazlat@gmail.com*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Москва, 119991, Россия  
E-mails: dsim\_0@mail.ru, zakharov@geol.msu.ru*

В цифровой модели рельефа (ЦМР) оси долин (штрихи) выявляются сравнением с локальными моделями долин (методика LESSA — *англ.* Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis). Эти штрихи найдены в линейке данных на одну территорию с разным разрешением, сопоставлены с осями долин нескольких начальных порядков, построенных по исходной ЦМР стандартными инструментами ГИС. На участке Буреинского хребта с хорошо выраженным рельефом обнаружены следующие закономерности. 1. Ширина долин (локальное расстояние между хребтами, ограничивающими долину) одного порядка в основном близка и у большинства долин варьируется в два раза. 2. Средняя ширина долин двух последовательных порядков отличается в два раза. Этот вывод основан как на сопоставлении построенных осей долин со штрихами разного масштаба, так и на сходстве рисунка линий вытянутости (локального среднего направления) штрихов с линиями вытянутости осей долин ГИС соответствующего порядка. 3. С повышением порядка число долин становится примерно в четыре раза меньше, их средняя длина вдвое больше, а их суммарная длина вдвое меньше. Эти закономерности выполняются как минимум для долин первых четырёх порядков и по смыслу близки к отношениям Хортона с тем отличием, что рассматривается не отдельная речная система, а регион, и не существующие потоки, а оси долин. 4. Найденные ранее особые масштабы, при переходе к которым резко изменяется среднее направление штрихов, можно связать с долинами определённых порядков. Это означает, что изменение направления может быть связано с тем, что в то время, когда закладывались долины этих порядков, в регионе произошла значительная перестройка структурного плана, вызвавшая смену ориентировки структурных элементов рельефа.

**Ключевые слова:** ЦМР, ось долины, порядок долины, соотношения Хортона, среднее направление осей долин

Одобрена к печати: 13.10.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-97-107

### Введение

Автоматический анализ доступных цифровых моделей рельефа (ЦМР) позволяет находить новые возможности изучения рельефа, новые параметры его описания и, в частности, новые подходы к количественному анализу долин. В настоящей работе представлены первые результаты совместного использования двух различных инструментов анализа ЦМР. С одной стороны, в ходе исследований по району Сихотэ-Алиня и прилегающих территорий (Захаров и др., 2021, Симонов и др., 2021) по модели SRTM (*англ.* Shuttle radar topographic mission) стандартными инструментами ГИС (геоинформационные системы) (Нугманов и др., 2016) построена схема водотоков разных порядков (фактически это линии продольных осей долин). А с другой стороны, тот же участок SRTM с последовательным изменением разрешения был обработан программой автоматизированного анализа линейных элементов LESSA (*англ.* Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis), которая позволяет выявлять и оси долин (Златопольский, 2011).

Цель данной работы — сопоставить долины разного порядка с долинами разного масштаба (разной ширины), получаемые в LESSA, посмотреть, какие новые результаты, какие закономерности можно при этом обнаружить. Такие исследования ещё не проводились, и здесь

обозначены только первые методологические шаги, первые оценки, но, как нам представляется, и они имеют самостоятельный интерес.

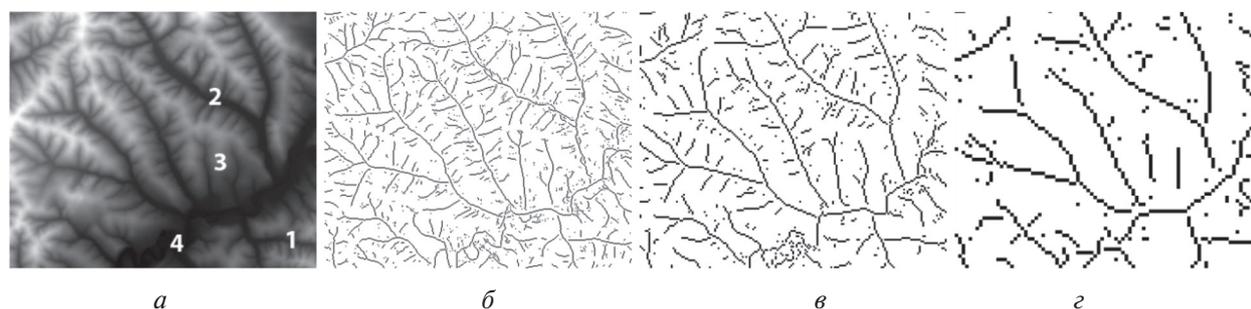
Схема осей долин для данного анализа была построена по SRTM с помощью инструмента расчёта гидрологических характеристик, который является стандартным для большинства как коммерческих, так и открытых программных пакетов ГИС, таких как ArcGIS или QGIS. В использованном алгоритме из восьми возможных направлений стока из пикселя выбиралось направление с наибольшим значением градиента с последующим определением величины суммарного стока для каждого пикселя и отсечением участков слабого стока по пороговому значению. Полученные таким образом оси долин были классифицированы на порядки. Порядок долины повышался при слиянии двух долин, имеющих порядок на единицу меньше, а пересечение двух долин разных порядков не приводило к увеличению порядка (Strahler, 1957).

В свою очередь, алгоритмы и результаты мультимасштабного анализа с помощью методики LESSA необходимо пояснить. С этого и начнём изложение. Затем сопоставим долины разной ширины с долинами разного порядка и далее проанализируем результаты статистического анализа параметров долин.

### Ширина долины

Ключевым объектом анализа в настоящей работе выступают оси долин. Оси долин (как и хребтов) в LESSA ищутся сравнением окрестности каждого пикселя ЦМР с моделями долин разных направлений. Модель круглая, диаметр 10 пикселей, содержит два встречных склона, снижающихся к центру. Оценивается сходство модели с окрестностью пикселя, крутизна склонов не учитывается. Затем с этой же окрестностью последовательно сравниваются модели немного иного направления склонов. Оси долин обнаруживаются попиксельно в тех местах, где с одной из моделей получается хорошее совпадение. Эти пиксели составляют линии, которые далее будем называть «штрихи».

Для каждого пикселя, отнесённого к оси долины, можно измерить локальное расстояние между двумя хребтами, которые ограничивают долину в этом месте. Будем называть эту величину «шириной долины». Ширина долины измеряется в пикселях, а с учётом разрешения ЦМР переводится в метры. Как показали предыдущие методические исследования, используемый в LESSA алгоритм практически не находит пиксель оси долины, если ширина долины в этом месте меньше 5 пикселей. Хорошо выявляются оси долин с шириной 8 пикселей и больше. Но если ширина долины в разы больше 8, то вместо оси долины выявляются детали поймы. Продемонстрируем это на примере *рис. 1*.



*Рис. 1.* Пример выявления алгоритмом LESSA долин (штрихов) разной ширины: *а* — фрагмент ЦМР (светлый тон — повышенный рельеф, тёмный — пониженный), цифры — номера областей, обсуждаемых в тексте; *б* — штрихи, найденные при исходном разрешении; *в* — при сжатии вдвое; *г* — при сжатии в 4 раза

На *рис. 1а* представлен фрагмент ЦМР, 354×257 (чем выше, тем тон светлее), и указаны четыре области, о которых речь пойдёт ниже. На остальных рисунках показаны штрихи, найденные при исходном разрешении (см. *рис. 1б*), при сжатии в 2 и 4 раза (*рис. 1в* и *г*).

Измеренная вручную ширина долин притоков в области 1 — около 11 пикселей, поэтому они хорошо выделяются при исходном разрешении и отсутствуют при в два раза меньшем разрешении. Измеренная по исходной ЦМР ширина долин притоков в области 2 — около 17 пикселей, они хорошо выделяются при сжатии в 2 раза и отсутствуют при разрешении, ещё вдвое меньшем. Ширина долин притоков в области 3 — около 35 пикселей, они хорошо выделяются при сжатии в 4 раза и отсутствуют при ещё вдвое меньшем разрешении. В области 4 находится широкая пойма, которая распадается на мелкие детали, а как целое выявляется только при сжатии в 5,6 раз.

Тот факт, что долины с шириной меньше 8 пикселей выявляются хуже, а с шириной меньше 5 пикселей не выявляются почти совсем, позволяет, пусть и приблизительно, оценить ширину выявляемых долин. Конечно, гораздо проще и точнее ширину долины в любой её точке можно измерить по ЦМР вручную. Однако предлагаемый ниже метод позволяет одновременно получить хоть и приблизительную оценку, но для многих долин — по всей рассматриваемой территории. Ширину долины, которая при данном разрешении выявляется уверенно, при том что более узкие долины выявляются уже явно хуже, будем дальше называть граничной.

Обратим внимание, что во избежание путаницы далее осями долин будем называть линии, полученные в ГИС, а штрихами — линии, полученные в LESSA.

### Ширина долин разных порядков

Обычно с ростом порядка долин растут их средняя длина и средняя площадь их водосбора. Р.Е. Хортон (1948) сформулировал эмпирические закономерности степенного роста этих параметров. Естественно предположить, что чем выше порядок долины, тем в среднем больше и её ширина. С помощью описанной выше процедуры попробуем проверить эту гипотезу в первом приближении. Начинаем с территории, где хорошо выражен рельеф и нет широких пойм и равнин.

Анализировался район верховьев р. Буреи,  $50,783\text{--}53,254^\circ$  с.ш. и  $133,221\text{--}135,998^\circ$  в.д. (рис. 2, см. с. 100). Для построения порядковой схемы осей долин использовались трёхсекундные данные SRTM. Глубина заполняемых локальных депрессий (для получения связанной и непрерывной модели) подбиралась от 4 до 20 м в зависимости от конкретного участка. Порог по площади водосбора для определения долин первого порядка, исходя из рассматриваемой в указанной работе задачи, был выбран в 200 пикселей. Максимальный порядок долины на этой территории — 7. Для сопоставления со штрихами все оси долин одного порядка представлялись единым растровым файлом с разрешением 81 м/пиксель.

При поиске долин в LESSA те же SRTM-данные пересчитывались в линейку ЦМР в проекции UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator, проекция Меркатора) (которая сохраняет направления) и с различным разрешением, начиная с 65,1 м/пиксель,  $2844 \times 4195$ ,  $185 \times 273$  км. Использовано 9 шагов генерализации с изменением масштаба на каждом шаге в  $\sqrt{2}$  раз, так что разрешение на  $n$ -м шаге было  $65,1\sqrt{2}^{n-1}$  м. Для каждого шага осуществлялся поиск штрихов. Граничная ширина выявляемых долин составляет для этих шагов  $0,5208\sqrt{2}^{n-1}$  км.

Оси долин определённого порядка последовательно сопоставляли со штрихами, полученными на разных шагах генерализации, начиная с первого, и смотрели, покрывают ли штрихи эти оси или нет. Как правило, сначала все оси долины покрыты штрихами (как на рис. 3б, см. с. 100), но с некоторого шага они покрыты только частично (как на рис. 3в), далее — ещё меньше, и ещё с некоторого шага оси долин в основном не покрыты (как на рис. 3г). Шаг с самым большим номером, при котором ось долины ещё хорошо покрывается штрихами, а точнее — граничная ширина этого шага, и даёт оценку ширины долины. Понятно, что тут есть некоторый произвол. Например, можно было ориентироваться на граничную ширину шага, при котором покрыта половина оси долины, однако, сохраняя единый способ оценки для разных долин, мы можем адекватно оценить соотношение их ширины, что важнее для данного исследования.

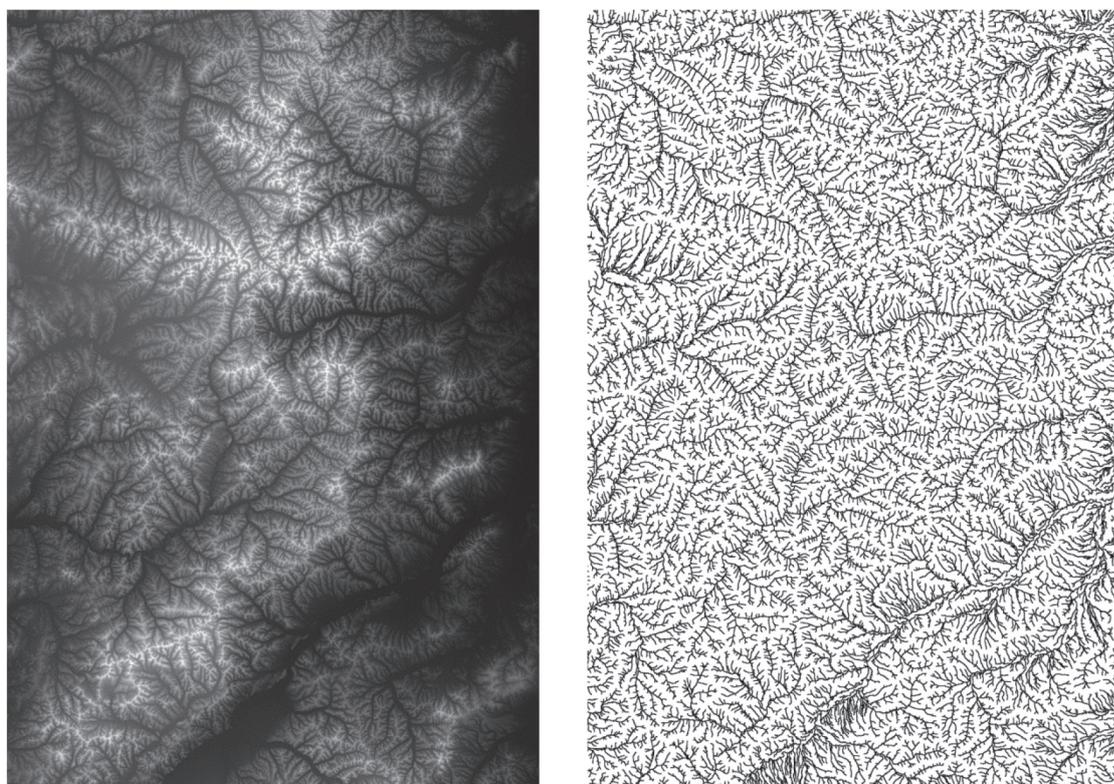


Рис. 2. Карта-схема, ЦМР и оси долин рассматриваемой территории

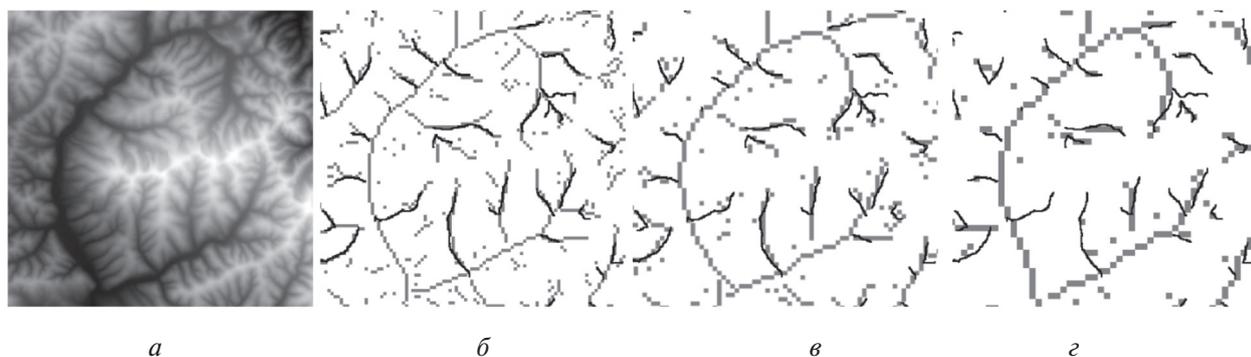


Рис. 3. Фрагмент ЦМР (а) и пример сопоставления осей долин 2-го порядка (чёрные линии) и штрихов (серые) 5–7-го шагов (б–г). Подробности в тексте

Такое сопоставление осей долин с последовательностью штрихов показало, что для долин одного порядка граничная ширина оказывается примерно одинаковой на всей территории. (Напомним, что пока не учитываются сложные области опускания и выравнивания.) То есть до какого-то шага изменения масштаба почти все оси долин этого порядка покрываются штрихами, а начиная со следующего шага степень покрытия резко уменьшается. Обычно почти полное исчезновение покрытия происходит за два шага. Всё это означает, что ширина долин одного порядка не сильно различается (в основном меньше чем в 2 раза).

Оказалось, что долинам первого порядка соответствует граничная ширина шага 3, т.е. около 1 км, долинам 2-го порядка — шаг 5 (2 км), долинам 3-го порядка — шаг 7 (4 км). Такая зависимость ( $2^{k-1}$  км, где  $k$  — номер порядка) сохраняется до 5-го порядка. Для более старших порядков оценивать по этим данным нет смысла, так как уже и для 5-го порядка на этой территории мало долин (33) и штрихи, полученные по сжатию до такой степени ЦМР, уже слишком грубы.

Существенным результатом можно считать не абсолютные значения ширины долины для разных порядков, а соотношение их ширины, так как конкретный номер порядка принципиально зависит и от используемой ЦМР, и от выбора параметров расчёта, скажем от порога по площади бассейна для долин первого порядка.

Конечно, предложенный способ оценки довольно приблизительный. Однако, как представляется, тот факт, что сходное увеличение (в два раза) ширины долины при переходе к долинам следующего порядка сохраняется при стольких (четырёх) переходах, указывает, что большой неточности в оценке этой величины нет, так как иначе постепенно накопилось бы расхождение хотя бы на один масштабный шаг ( $\sqrt{2}$  раз).

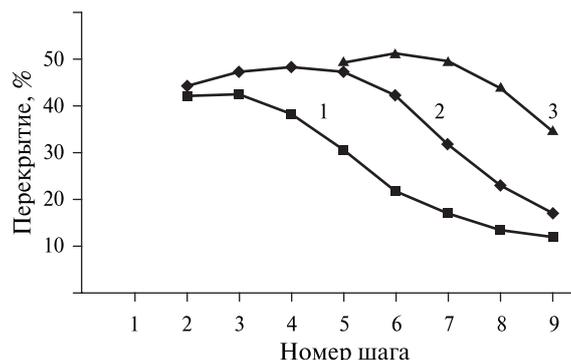
Отметим следующее обстоятельство. Прямая численная оценка степени перекрытия осей долин штрихами — какой процент суммарной длины осей долин перекрыт — в целом верна, но нередко перекрытие оси долины не наблюдается только формально по следующим причинам:

- штрих может идти параллельно оси долины, но в соседних пикселях;
- крупные пиксели штрихов старших шагов могут покрывать линию оси долины прерывисто, не сплошь;
- в районе устья притока 1–2 пикселя в его штрихах может теряться не потому, что долина притока узка, а в силу того, что геометрическая ситуация в устье не соответствует простой модели долины, используемой при поиске штрихов.

Все эти ситуации сказываются на численной оценке, но могут быть учтены экспертом при выборе того, штрихи какого из соседних шагов всё ещё хорошо покрывают долины данного порядка.

И всё же, хотя численная оценка перекрытия и даёт заниженные значения, но для младших порядков общая тенденция в этой оценке сохраняется. Так, на *рис. 4* показан процент перекрытия штрихами долин 1–3-го порядков. По оси абсцисс отложен номер шага (масштаб) расчёта штрихов, а по оси ординат — процент общей длины осей долин одного порядка, перекрытых штрихами. Этот процент нормирован на число пикселей в соответствующем файле штрихов (в мегапикселях), поскольку чем больше «суммарная площадь» штрихов, тем выше вероятность перекрыть отдельные оси долин случайно. При этом «площадь» штрихов монотонно уменьшается от шага 2 к шагу 9 почти в 2 раза (от 1,65 до 0,88 мегапикселей).

*Рис. 4.* Нормированный процент перекрытия штрихами осей долин 1–3-го порядков в зависимости от номера шага (масштаба) расчёта штрихов



Как видим, резкое падение перекрытия начинается для осей долин 1-го порядка со штрихов шага больше чем 3, для долин 2-го порядка — после шага 5, а для долин 3-го порядка — после шага 7. Дальше кривые идут почти параллельно с расстоянием в два шага.

По результатам данного эксперимента можно предварительно заключить, что как минимум на данной территории средняя ширина долин изменяется аналогично другим параметрам, проанализированным Хортоном, — как степенная функция порядка, и её показатель — 2.

### Статистика долин

Рассчитаем для этой территории другие характеристики долин. Отличие от обычных измерений характеристик бассейнов состоит в том, что рассматриваются не существующие потоки, а оси долин, и не отдельный речной бассейн или система, а некоторая территория. Длину осей долин измеряем на растре, в пикселях, что связано с известными погрешностями. Однако отношение суммарных длин осей долин, которое нас будет интересовать, для долин младших порядков должно быть достаточно точным. Следует иметь в виду, что оси долин первого порядка обрезаны по длине порогом по площади водосбора, а долин выше 4-го порядка мало для надёжной статистики. Особенно падает точность (занижается величина) у средней длины осей долины, так как уже для 5-го порядка 40 % долин (12 из 33) уходит за край территории. Результаты измерений приведены в *таблице*, где  $k$  — это номер порядка и для долин этого порядка;  $S_k$  — суммарная длина долин;  $Z_k$  — суммарная длина всех долин порядка  $k$  и выше;  $N_k$  — число долин и  $L_k$  — средняя длина долины.

Результаты анализа соотношений длины и количества долин

$k$	$S_k$	$S(k-1)/S_k$	$Z_k$	$S_k/Z(k+1)$	$N_k$	$N(k-1)/N_k$	$L_k$	$L_k/L(k-1)$
1	278 504		539 838	1,07	11 135		25,01	
2	134 769	2,07	261 334	1,07	2 543	4,38	53,00	2,12
3	67 607	1,99	126 565	1,15	610	4,17	110,8	2,09
4	30 951	1,96	58 958	1,11	158	3,86	195,9	1,77
5	17 719	1,75	28 007	1,72	33	4,78	537,00	2,74
6	10 288	1,72	10 288		8	4,13	1286,00	2,40

По данным *таблицы* для первых четырёх порядков можно предположить соотношения  $N \approx 4,13^{-k}$  и  $L \approx 2^k$ , что близко закономерностям Хортона, установленным для характеристик бассейнов. Из соотношения  $L \approx 2^k$  понятно, почему отношение суммарной длины долин данного порядка к суммарной длине всех долин более старших порядков близко к 1 (так как сумма геометрической прогрессии с шагом 1/2 стремится к 1). То, что для пятого порядка это не выполняется, вполне вероятно, связано с малочисленностью таких долин.

Рассмотрим и другие соотношения для бассейнов (Pelletier, 1999). Так, число потоков  $N$  и длина потоков  $L$  данного порядка соотносится с площадью водосбора  $A$  для ряда проанализированных бассейнов примерно как  $N \approx A^{-1}$  и  $L \approx A^{0.5}$ . Наш анализ касается не площади водосбора, а ширины долин  $d$  на некоторой территории, однако, если упрощённо полагать, что площадь долины приблизительно равна  $d^2$ , то можно получить аналогичные соотношения. Действительно, если, как отмечено выше,  $d = 2^{k-1}$ , т.е.  $d^2 = 4^{k-1}$ , то  $N \approx (d^2)^{-1} = d^{-2}$  и  $L \approx (d^2)^{0.5} = d$ .

Отметим, что соотношения такого плана — между длиной долин и площадью соответствующих бассейнов — могут оказаться не квадратичными за счёт фрактальных свойств рельефа. Важно также оценить степень изометричности долин (соотношение их длины и ширины), так как данный показатель потенциально может быть использован для выявления и характеристики вертикальных движений поверхности. Однако это требует дальнейшего исследования и разработки методики.

В заключение раздела в качестве примера сопоставим суммарную длину штрихов и осей долин. Как отмечено выше, оси долин 2-го порядка полностью и без избытка покрываются штрихами 5-го шага. Напомним, что эти штрихи покрывают и оси долин всех более высоких порядков. Штрихи 5-го шага имеют на этой территории суммарную длину 19 417 км. Если пересчитать в километры суммарную длину осей долин 2-го порядка (учитывая, что их линии на растре 4 связны), то получим величину вдвое меньше — 9747 км. Теперь это соотношение понятно: половина штрихов относится к долинам более высокого порядка, чья длина суммарно такая же, как у долин второго порядка.

### Статистика ориентации штрихов и осей долин

Штрихи (оси долин и хребтов) и их ориентация ищутся в LESSA для того, чтобы оценить, какие направления присутствуют в рельефе, как они сочетаются. Чаще всего локальная ситуация описывается вектором среднего направления розы-диаграммы, рассчитанной по штрихам в скользящем окне. Векторы отдельных роз-диаграмм складываются в «линии вытянутости» (ЛВ) (Златопольский, 2011), которые наглядно показывают изменение среднего направления по территории. Сопоставим, насколько линии вытянутости, рассчитанные для штрихов, сходны с линиями вытянутости осей долин соответствующего порядка. По найденным выше соотношениям, штрихи с шириной долины 1 км соответствуют долинам порядка 1 и выше, т. е. всем найденным долинам порядка 1–7, штрихи с шириной долины 2 км — долинам порядка 2–7 и т. д.

На *рис. 5а* (см. с. 104) представлены ЛВ штрихов с долинами шириной от 1, 2, 4 и 8 км (точнее 1,04; 2,08; 4,17 и 8,33 км), а на *рис. 5б* — ЛВ осей долин порядков 1–7, 2–7, 3–7 и 4–7 соответственно. Долин выше 4-го порядка на этой территории слишком мало для статистических измерений. Оцениваем сходство рисунка ЛВ в целом. В нём нет мелких деталей, так как для расчёта роз-диаграмм использовано большое окно (94 км), которое было принято в мультимасштабных исследованиях (Златопольский, 2017). Различие ЛВ осей долин порядков 3–7 и штрихов с шириной долин от 4 км обсудим ниже, а высокое сходство остальных пар подтверждает, что соответствие порядков и ширины долин найдено верно: ширина долин каждого следующего порядка больше в 2 раза.

Отмеченное ранее практическое равенство суммарной длины долин текущего порядка и суммарной длины всех долин более высокого порядка говорит в пользу того, что рисунок ЛВ во многом определяется самыми мелкими (для использованного разрешения) элементами рельефа. В случае с осями долин это предположение можно проверить. На *рис. 5в* приведены ЛВ осей долин порядков 1–4. Действительно, их сходство с ЛВ *рис. 5б* велико, а первые две пары практически идентичны.

Поскольку для штрихов мы получаем статистику только для долин большого диапазона ширины, необходимо учитывать следующее обстоятельство. Если среднее направление широких долин (скажем, начиная с масштабного шага  $n$ ) изменяется существенно и единообразно, то это изменение проявится уже в суммарной статистике штрихов, начинающейся с меньшего масштабного шага ( $n-2$ , а может, и  $n-3$ ). Скорее всего, именно этим обусловлено расхождение ЛВ штрихов от 4 км и ЛВ осей долин 3-го порядка.

В упомянутых выше мультимасштабных исследованиях анализировалась смена среднего направления штрихов в окне при изменении масштаба анализа. В ряде случаев направление изменялось резко — скачком (больше чем на  $40^\circ$  за два масштабных шага). Для каждого масштаба анализа подсчитывалось количество перекрывающихся окон, в которых смена направления произошла скачкообразно. Также проанализирована и территория Дальнего Востока  $47,15-53,5^\circ$  с. ш. и  $130,66-140,11^\circ$  в. д., которая включает верховья Буреи. Гистограмма скачков для этой территории показана на *рис. 6* (см. с. 105).

Здесь, как и на многих других территориях, скачкообразная смена направления элементов рельефа происходит неравномерно по всем масштабам; на каких-то масштабах это случается гораздо чаще, что формирует пик гистограммы. На *рис. 6* этот пик указывает на резкую

смену направления при переходе от штрихов, соответствующих долинам младших порядков, к штрихам долин с шириной 6 км и выше. Как мы отмечали, фактически пик обусловлен синхронным изменением направления более широких долин, шире 8 км, т. е. долин 4-го порядка, а особенно 5-го порядка и выше.

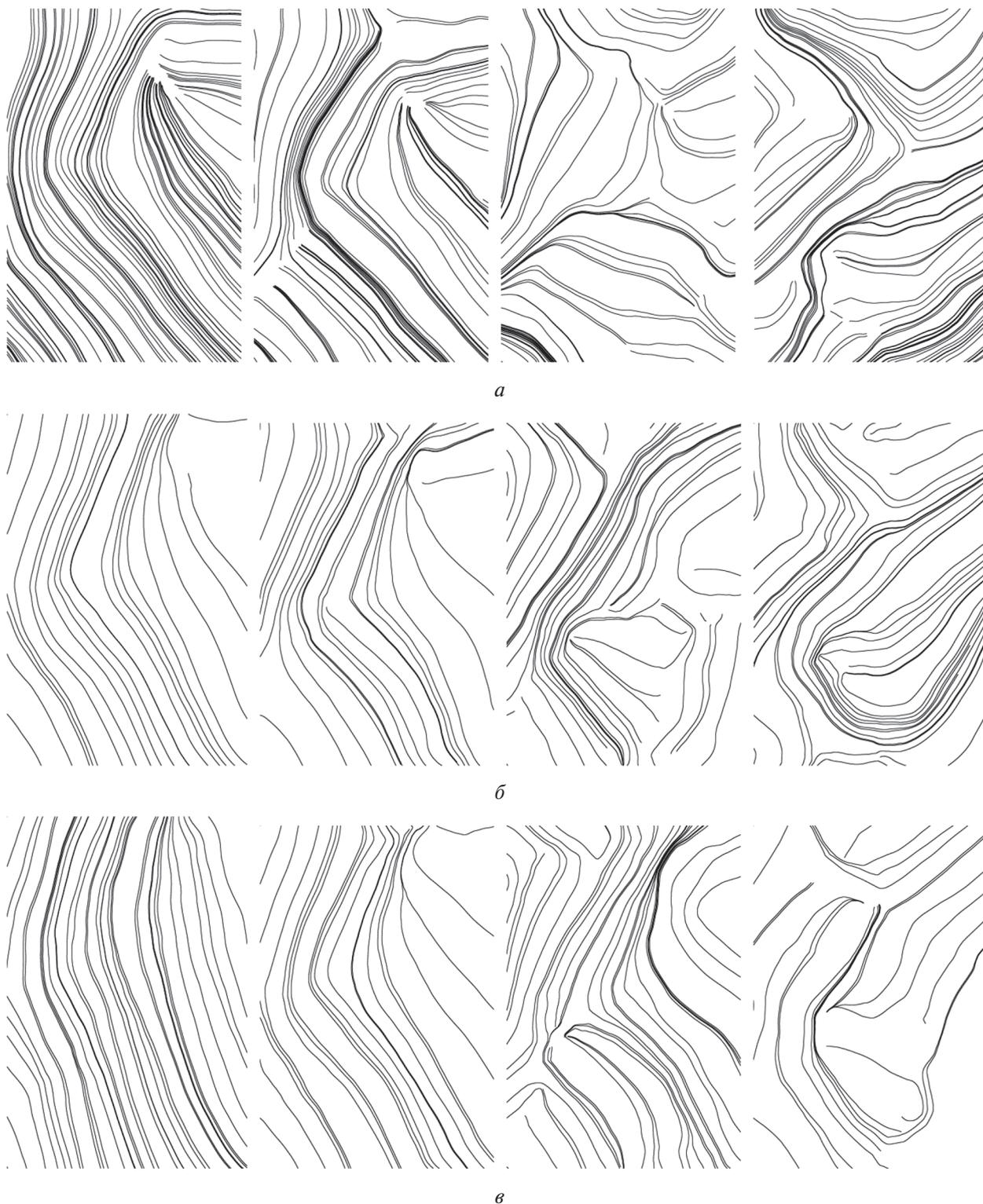
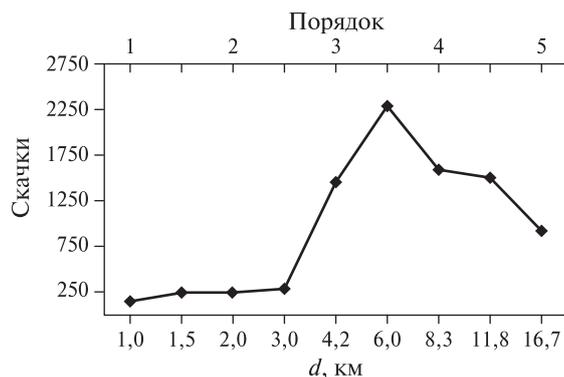


Рис. 5. Линии вытянутости по штрихам и осям долин: а — ЛВ для штрихов с долинами шириной от 1, 2, 4 и 8 км; б — ЛВ осей долин порядков 1–7, 2–7, 3–7 и 4–7; в — ЛВ осей долин порядков 1–4

Рис. 6. Число скачков смены локального среднего направления штрихов на разных масштабных шагах с граничной шириной долин ( $d$ ) и соответствующий номер порядка долин



Такая резкая смена ориентировки долин может быть связана с активизацией тектонических процессов и сменой структурного плана региона, что отразилось в смене направления элементов рельефа, закладывавшихся в то время. Активизация новейших движений, вероятнее всего, была синхронна с достаточно широко проявленным в регионе плиоценовым базальтовым вулканизмом (Захаров и др., 2021; Симонов и др., 2021). Это предположение очень важно, так как даёт возможность проследить следующую связь: ширина долин – порядок долин – время их формирования – время событий (тектонических и др.), которые тогда определяли направление элементов рельефа.

### Заключение

В результате сопоставления осей долин, которые выявляются в ЦМР сравнением с локальными моделями (штрихи в методике LESSA), и осей долин, построенных по ЦМР стандартными инструментами ГИС, обнаружен ряд закономерностей. Сформулируем их, учитывая, что это первые шаги исследования, которое осуществлено пока только на одном участке с хорошо выраженным рельефом. Напомним, что шириной долины мы называем локальное расстояние между хребтами, ограничивающими долину.

1. Значения ширины долин одного порядка довольно близки, основной интервал разброса — около двух раз. Это обстоятельство, в частности, позволяет за счёт анализа долин одного порядка определить вклад в общий рисунок рельефа долин соответствующего масштаба (диапазона ширины).
2. Средние значения ширины долин двух последовательных порядков различаются в два раза. Это соотношение было получено и при сопоставлении долин со штрихами разного масштаба, и по сходству рисунка линий вытянутости (локального среднего направления) элементов рельефа с линиями вытянутости осей долин соответствующего порядка.
3. С повышением номера порядка число долин уменьшается в четыре раза, средняя длина долин становится вдвое больше, а их суммарная длина — вдвое меньше.

Эти закономерности в наших измерениях выполняются как минимум для долин первых четырёх порядков. И по смыслу, и по величинам они близки к отношениям Хортон, при том что нами рассматривались не отдельная речная система или бассейн водосбора, а регион в целом, и не существующие потоки, а оси долин.

Представляется, что нужно проверить эти соотношения в более точной, векторной форме. А также посмотреть и аналогичные соотношения по площади водосбора.

4. При мультимасштабном анализе (Златопольский, 2017) были обнаружены «особые масштабы», при переходе к которым резко изменяется среднее направление штрихов. Аналогичный «особый масштаб» обнаружен для данного региона, и он соотносится с долинами определённых порядков. Анализ неотектоники региона даёт возможность предположить, что в плиоцене, когда закладывались долины этих порядков, в регионе произошла значительная перестройка структурного плана со сменой ориентировки структурных элементов рельефа. Что даёт возможное объяснение причины резкой смены направления элементов рельефа «особого масштаба».

Отметим, что, безусловно, необходимо и планируется проверить эти закономерности более детально, а также и на других территориях.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164 и тема № АААА-А16-116033010118-7).

## Литература

1. Захаров В. С., Симонов Д. А., Гильманова Г. З., Диденко А. Н. Характеристики самоподобия сети водотоков и неотектоника Северного Сихотэ-Алиня и сопредельных территорий // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20. № 2. С. 62–74.
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. Златопольский А. А. Мультимасштабный анализ ориентации текстуры поверхности Земли. Особые масштабы. Третья часть. Иерархия долин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 37–46. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-37-46.
4. Нугманов И. И., Нугманова Е. В., Чернова И. Ю. Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур. Казань: Казанский ун-т, 2016. 53 с.
5. Симонов Д. А., Захаров В. С., Гильманова Г. З., Диденко А. Н. Новейшая тектоника Северного Сихотэ-Алиня и сопредельных территорий и ее отражение в характеристиках самоподобия гидросети // Вестн. Московского ун-та. Сер. 4: Геология. 2021. № 5. С. 19–30.
6. Хортон Р. Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов: Гидрофизический подход к количественной морфологии: пер. с англ. / пер. Д. Л. Арманд, В. А. Троицкого; под ред. М. А. Великанова. М.; Л.: Изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.
7. Pelletier J. D. Self-organization and scaling relationships of evolving river networks // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. No. B4. P. 7359–7375.
8. Strahler A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology // Trans. American Geophysical Union. 1957. V. 38. No. 6. P. 913–920.

## Ordinal statistics of valleys: length, width, direction (applied to Bureya Ridge)

A. A. Zlatopolsky<sup>1</sup>, D. A. Simonov<sup>2</sup>, V. S. Zakharov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: aazlat@gmail.com

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia  
E-mails: dsim\_0@mail.ru, zakharov@geol.msu.ru

Via comparing digital terrain model (DTM) with local valley models (LESSA methodology, Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) the valley axes (stripes) are detected. These stripes are found in the sequence of data for one territory but with different resolution and are compared with the axes of the first orders valleys, detected in the original DTM by standard GIS tools. The following regularities were found in the Bureya Ridge region with a well-defined relief. 1. The width of the valleys (the local distance between the ridges bounding the valley) of the same order is mostly similar and in most valleys varies at most by a factor of two. 2. The average width of the valleys of two consecutive orders differs most by a factor of two. This conclusion is based both on the comparison of the valleys axes detected in the GIS with stripes of different scales, and on the similarity of the elongation lines drawings (local average direction) of the stripes with the elongation lines of the axes of the corresponding order GIS valleys. 3. As the order increases, the number of valleys becomes about four times smaller, their average length becomes twice bigger, and their total length becomes two times shorter. These regularities are fulfilled at least for the valleys of the first 4 orders and are close in meaning to the Horton relations, with the difference that we consider not a separate river system, but a region, and not existing flows, but the axes of the valleys. 4. The special scales of DTM analysis found earlier, at which the average direction of the stripes changes abruptly, now could be associated with val-

leys of certain orders. This means that the change in the valleys direction may be due to the fact that at the time when the valleys of these orders were laid, there was a significant restructuring of the region structural plan, which caused a change in the orientation of the structural elements of the relief.

**Keywords:** DTM, valley axis, valley order, Horton ratios, average direction of valleys axis

Accepted: 13.10.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-97-107

## References

1. Zakharov V.S., Simonov D.A., Gilmanova G.Z., Didenko A.N., Self-similarity parameters of water stream network and neotectonics of Northern Sikhote-Alin and adjacent regions, *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, 2021, Vol. 20, No. 2, pp. 62–74 (in Russian).
2. Zlatopolsky A.A., 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 (in Russian).
3. Zlatopolsky A.A., Multiscale Earth surface texture orientation analysis. Special scales. Part three. Valley hierarchy, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 37–46 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-37-46.
4. Nugmanov I.I., Nugmanova E.V., Chernova I.Yu., *Osnovy morfometricheskogo metoda poiska neotektonicheskikh struktur* (Fundamentals of the morphometric method of searching for neotectonic structures), Kazan: Kazanskii universitet, 2016, 53 p. (in Russian).
5. Simonov D.A. Zakharov V.S., Gilmanova G.Z., Didenko A.N., Neotectonic vertical movements of Northern Sikhote-Alin and adjacent territories and its relationship with the characteristics of the stream network, *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 4: Geologiya*, 2021, No. 5, pp. 19–30 (in Russian).
6. Horton R.E., Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bul. Geological Society of America*, 1945, Vol. 56, pp. 275–370.
7. Pelletier J.D., Self-organization and scaling relationships of evolving river networks, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. B4, pp. 7359–7375.
8. Strahler A.N., Quantitative analysis of watershed geomorphology, *Trans. American Geophysical Union*, 1957, Vol. 38, No. 6, pp. 913–920.