Соотношение порядка и ширины долин, автоматически найденных по цифровой модели рельефа

А.А. Златопольский¹, В.А. Зайцев²

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: aazlat@gmail.com ² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Москва, 119991, Россия E-mail: v.zaitsev@mail.ru

Предлагается продолжение публикации результатов исследования, в котором оценивается ширина долин одного порядка. Использованы три больших участка (по 0,4 млн км²): «Амур», «Шилка», «Кама». Оси долин строятся по цифровой модели рельефа (ЦМР) стандартными инструментами ГИС. Ширина долины (локальное расстояние между хребтами, ограничивающими долину) определяется с помощью инструмента LESSA (англ. Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis), который по ЦМР отмечает долины с шириной больше заданной (штрихи). Ширина долин прядка k приблизительно оценивается как 2^{k-1} км. Эта оценка получена как за счёт сопоставления ориентационной статистики долин и штрихов, так и путём прямого сопоставления линий долин и штрихов на участке «Шилка». На этом участке получены и другие соотношения: число долин — $\propto 4,47^{-k}$, средняя длина долин — $\propto 2,15^k$. Эти закономерности выполняются как минимум для долин первых пяти 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. Показана возможность статистического анализа с помощью LESSA линий долин, построенных в ГИС, что существенно дополняет прямой анализ ЦМР в LESSA. Найденные ранее особые масштабы анализа ЦМР, на которых резко изменяется среднее направление штрихов, теперь соотносятся с долинами определённых порядков, а заложение долин этих порядков может быть связано с конкретными тектоническими событиями.

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

Одобрена к печати: 30.11.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-141-151

Введение

В статье (Златопольский и др., 2021) были сделаны первые шаги для объединения двух распространённых методик автоматического анализа цифровой модели рельефа (ЦМР): построение тальвегов, определение их порядка моделированием в геоинформационной системе (ГИС) процесса стока (например, как в работе (Нугманов и др., 2016)) и поиск осей долин для их статистического анализа в программе линеаментного анализа LESSA (*англ*. Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) (Златопольский, 2020). Сочетание этих подходов позволяет получить новый тип результатов, новые характеристики для изучения территории, а также оценить некоторые, малоизученные, свойства рельефа.

Изложение начнём со специфического узкого определения двух известных терминов, так как здесь мы будем использовать их в специальном, математическом, а точнее алгоритмическом смысле. Так, локальной шириной долины (или просто — шириной долины) будем называть расстояние между осями водоразделов, ограничивающих рассматриваемую долину. А под порядком долины будем подразумевать ту величину порядка, которая получается при анализе конкретной ЦМР указанным выше алгоритмом с фиксированными параметрами. Поэтому всё время нужно иметь в виду, что величина порядка несколько условна: достаточно существенно изменить параметры поиска и значения порядков изменятся. Однако, используя при анализе разных регионов единые ЦМР и параметры алгоритма, мы получаем сопоставимые объективные, «формальные» характеристики территорий.

Для этого исследования принципиально важно, что оба указанных подхода создают иерархии долин. При моделировании процесса стока в ГИС получаем иерархию долин разных порядков. При поиске долин в LESSA не важна их глубина, но очень существенна их ширина (в указанном выше смысле): долины шириной около 8 пикселей, которые будем называть базовыми, хорошо выявляются, они самые многочисленные, а те, что имеют ширину 4 пикселя, уже практически не выявляются. Чтобы далее было понятно, о каком способе поиска долин по ЦМР идёт речь, будем называть линии долин, найденные в LESSA, штрихами. Если в LESSA перейти на другой масштабный уровень анализа (сжав ЦМР), то штрихи прежних базовых долин исчезнут и базовыми станут другие, соответствующие более широким долинам. Интуитивно понятно, что линейка последовательных результатов такого мультимасштабного анализа ЦМР аналогична схеме гидросети, в которой шаг за шагом удаляются долины самого младшего порядка.

В первом исследовании оси долин отдельных порядков сравнивались со штрихами, полученными LESSA в последовательности ЦМР всё более мелкого масштаба (шаг изменения разрешения — в $\sqrt{2}$ раз). Было установлено, что удаление из схемы сети долин минимального порядка аналогично изменению в LESSA масштаба анализа в два раза. Или, что то же самое, ширина долин последующих порядков отличается в два раза.

Этот результат для небольшой территории Буреинского хребта (180×270 км) был получен для первых четырёх порядков. Долин более высоких порядков было слишком мало. Цель данной работы — проверить этот результат на большей территории, а главное — на разных территориях. Методики, которые при этом использованы, подробно описаны в статье (Златопольский и др., 2021). Использована та же модель SRTM (*англ*. Shuttle Radar Topographic Mission) в полном разрешении. Порядок долин определяется по методу Стралера, когда порядок увеличивается только при слиянии долин одного порядка. А для долин 1-го порядка введён порог на площадь водосбора в 200 пикселей.

Кроме указанной цели, оценим также перспективы статистического ориентационного анализа с помощью LESSA схем долин, получаемых в ГИС.

Непосредственное сопоставление долин и штрихов

Пока нет возможности измерить в нескольких местах ширину каждой долины одного порядка и найти общее среднее значение. Поэтому общую оценку ширины получаем иначе. Например, если среди долин порядка k много долин с шириной 4 км, существенно меньше долин с шириной 6 км и почти нет долин шириной 8 км и больше, то для долин этого порядка даётся оценка ширины в 4 км.

Начнём анализ с ЦМР территории в окрестности р. Шилки, 49,3–54,96° с. ш., 112,22– 121,65° в.д., 685,5×640 км, в проекции UTM (*англ*. Universal Transverse Mercator, универсальная поперечная проекция Меркатора). Выбор именно этой территории и проекции обоснуем далее. Для расчёта штрихов разного масштаба используется ЦМР с разным разрешением: начи-

наем с 65,1 м/пиксель и последовательно увеличиваем в $\sqrt{2}$ раз, т.е. 0,0651 $\sqrt{2}^{n-1}$ км на шаге *n*. На первом шаге уверенно выявляются долины, начиная с базовых, ширина которых составляет

8 пикселей, или 0,5 км, а на шаге n — долины с шириной, начиная с базовой $0.5\sqrt{2}^{n-1}$ км.

Линии осей долин порядка k, полученные в ГИС, переводятся в растр и сопоставляются с указанной последовательностью изображений штрихов. Если некоторой линии долины соответствует штрих на масштабных шагах 1, 2, ..., n и нет соответствующего штриха на шаге n + 1, то ширину этой долины можно оценить, исходя из базовой ширины для предыдущего шага n, $0,5\sqrt{2}^{n-1}$ км. Исходя из этого, чтобы приблизительно оценить ширину всех долин одного порядка, посмотрим, как штрихи каждого масштабного шага покрывают линии долин этого порядка. Если линии долин в среднем хорошо покрываются штрихами на масштабных шагах 1, 2, ..., n и покрытие резко уменьшается на шаге n + 1, то ширину этих долин можно оценить как $0,5\sqrt{2}^{n-1}$ км.

Рис. 1. Процент покрытия штрихами осей долин порядков 2–4 в зависимости от номера масштабного шага расчёта штрихов. Ромбики — порядок 2, квадратики — порядок 3, треугольники — порядок 4

Фактически штрихи и линии долин не совпадают пиксель в пиксель, поэтому даже на малых масштабных шагах не получаем полное покрытие. С другой стороны, покрытие не пропадает полностью на каком-то одном шаге, а па-



дает постепенно за 2–3 шага. Поэтому обратим внимание не на абсолютную величину покрытия линий штрихами, а на динамику этого показателя.

На *рис. 1* показан процент покрытия штрихами долин 2-4-го порядков. Долин этих порядков достаточно много, а долины 1-го порядка мы не используем в статистике, так как они усечены по длине за счёт порога на площадь водосбора. По оси абсцисс отложен номер масштабного шага расчёта штрихов, *n*, а по оси ординат — процент общей длины долин одного порядка, перекрытых штрихами. Несмотря на то, что измеряем среднее значение для тысяч долин, полученные кривые похожи и идут на расстоянии в два масштабных шага друг от друга. То есть ширина долин каждого следующего порядка увеличивается примерно в два раза (два масштабных шага).

Итак, мы оценили соотношение значений ширины долин последовательных порядков, но не абсолютную величину этих значений. В предыдущем исследовании небольшой территории у аналогичных кривых был достаточно резкий излом, который позволил предположить, какой именно масштабный шаг соответствует ширине долин каждого порядка. Но здесь такой излом обозначился только для долин 3-го порядка при переходе к масштабному шагу 7. Поэтому ограничимся утверждением об отличии значений ширины потоков младших порядков в два раза (для порядков выше 5-го у нас нет достаточно данных), а абсолютные значения ширины оценим далее иным путём.

Порядковые характеристики долин

Обратим внимание, что полученное соотношение ширины долин последовательных порядков хорошо вписывается в соотношения параметров долин, предложенные Р.Е. Хортоном (англ. R. E. Horton) (Horton, 1948). Рассмотрим эти соотношения для долин участка «Шилка». Отметим, что эти измерения отличаются от обычных характеристик бассейнов тем, что рассматриваются не существующие потоки, а тальвеги, и не отдельный речной бассейн или система, а некоторая территория. Длину долин измеряем на растре, в пикселях, что связано с известными погрешностями. Однако отношение длин, которое нас будет интересовать, должно быть достаточно точным. В *таблице* приводим статистику для достаточно многочисленных долин младших порядков, k, где S_k — суммарная длина долин, N_k — число долин, L_k — средняя длина долин и M_k — медиана длины долин.

k	S_k	$S(k-1)/S_k$	N_k	$N(k-1)/N_k$	L_k	$L_k/L(k-1)$	M_k	$M_k/M(k-1)$
2	10 97 904		25 776		42,6		27	
3	555 232	1,98	5 951	4,33	93,3	2,19	72	2,67
4	239 454	2,32	1 389	4,28	172,4	1,85	133	1,85
5	110 735	2,16	288	4,82	384,5	2,23	270	2,03

Результаты анализа соотношений длины и количества долин

По этим данным получаются соотношения $N \propto 4,47^{-k}$ и $L \propto 2,08^k$, что близко к закономерностям Хортона, установленным для характеристик бассейнов, и к тем, что были получены

нами в первом исследовании на другой территории ($N \propto 4,13^{-k}$ и $L \propto 2^k$). При анализе гидросетей для соотношения средней площади бассейнов последовательных порядков обычно получают величину роста примерно в четыре раза, а для средней длины долин — в два раза. С этим хорошо согласуется полученная выше величина роста ширины долин следующего порядка также в два раза. Обратим внимание, что значение средней длины смещено к высоким значениям, так как медиана везде в 1,3–1,5 раз меньше.

Статистический анализ направления долин. Участок «Шилка»

Какой именно масштаб анализа ЦМР (масштабный шаг) соотносится с долинами определённого порядка, определим косвенным образом. И тем самым получим оценку ширины долины каждого порядка.

Для этого используем особенности некоторых территорий, найденные при мультимасштабном анализе ЦМР (Златопольский, 2017). В LESSA по положению и ориентации штрихов (долин) можно оценить, какие ориентировки присутствуют в рельефе, как они распределены по территории, как сочетаются друг с другом. Локальное соотношение ориентировок описывается вектором среднего направления розы-диаграммы, рассчитанной по штрихам в скользящем окне. В мультимасштабных исследованиях в каждом окне анализировалось изменение среднего направления штрихов при изменении масштаба анализа. На каком-то масштабном шаге направление могло измениться резко, скачком — больше чем на 40° за два шага (масштаб меняется в два раза).

Для каждого масштабного шага подсчитывалось количество окон, в которых смена направления произошла скачкообразно, и строилась гистограмма скачков. Оказалось, что на многих территориях скачкообразная смена направления элементов рельефа происходит не равномерно по всем масштабам, а на каких-то масштабах это случается гораздо чаше, что формирует пики в гистограмме.

На *рис. 2* приведены гистограммы для трёх территорий. У территории «Шилка» на первых масштабных шагах ориентировка не меняется, скачков очень мало, а яркий пик на шагах 9 и 10 указывает на резкую смену направления по всей территории при переходе от штрихов, соответствующих узким долинам, к штрихам долин с шириной 8 км (шаг 9) и больше.



Рис. 2. Гистограммы числа скачков для районов: *а* — «Шилка»; *б* — «Амур»; *в* — «Кама». По оси абсцисс отложен номер масштабного шага

Эта особенность рельефа территории «Шилка» позволит нам, определив, у долин какого порядках происходит соответствующий скачок направления, соотнести номер порядка с номером «пикового» масштабного шага. Именно ради такой возможности все три территории, и в первую очередь эта, были выбраны для исследования. Использована проекция UTM, которая максимально сохраняет реальное соотношение направлений элементов рельефа. Построение гистограмм при анализе штрихов возможно в силу того, что штрихов обычно достаточно для статистики, а масштабные шаги можно делать произвольной, небольшой величины. А вот при анализе долин, полученных в ГИС, этих возможностей нет, поэтому воспользуемся другим способом зафиксировать обширное резкое изменение направления долин.



Рис. 3. Сопоставление линий вытянутости штрихов и долин участка «Шилка»

Векторы среднего направления роз-диаграмм, рассчитанных в отдельных окнах, объединяются в «линии вытянутости» (ЛВ) (Златопольский, 2020), которые наглядно показывают распределение среднего направления по территории. Рисунок ЛВ позволит нам сопоставить результаты анализа штрихов разного масштаба и долин определённых порядков. На каждом масштабном шаге выявляются штрихи и базовых, и более широких долин, поэтому и сравнивать ЛВ штрихов определённого масштаба нужно с ЛВ долин всех порядков, начиная с некоторого минимального.

Рисунок 3 (см. с. 145) позволит нам сопоставить последовательность результатов (ЛВ) для штрихов долин шириной от 2, 4, 8 и 16 км (масштабные шаги 5, 7, 9, 11), они в левом столбце, с последовательностью результатов для долин порядков 2–9, 3–9, 4–9, 5–9 в среднем столбце. Как видим, рисунок ЛВ в этих столбцах изменяется абсолютно синхронно: в первой строке (шаг 5 и порядки 2–9) почти по всей территории средние ориентировки направления ССЗ, во второй строке (шаг 7 и порядки 3–9) в одних и тех же местах появляется направление СВ, в третьей строке (шаг 9 и порядки 4–9) преобладают направления СВ и ССВ и в последней строке (шаг 11 и порядки 5–9) везде только направление СВ и близкие. Для долин более высоких порядков сохраняются направления СВ, ВСВ, но этих долин недостаточно для статистического анализа. Из экономии места не приведены ЛВ для порядков 1–9 и масштабного шага 3 (1 км) — там исключительно направление ССЗ.

Эти данные наглядно показывают, что при переходе к масштабному шагу 9 среднее направление большей части территории изменяется скачком, и это формирует пик в гистограмме, отмеченный выше. Для результатов второго столбца это резкое изменение происходит на ЛВ порядков 4—9. А значит, 4-й порядок соответствует масштабному шагу 9 с базовыми долинами шириной в 8 км. Отметим, что у ЛВ долин порядков 4—9 есть некоторое сходство и с ЛВ штрихов масштабного шага 8 (ширина долин от 5,7 км), хотя с ЛВ шага 9 сходство явно больше. Так что можно было бы оценить ширину долин 4-го порядка как 7,5, а не 8 км. Однако в таком уточнении нет особого смысла, учитывая косвенность наших измерений.

Как мы нашли выше, ширина долин последовательных порядков меняется в два раза, и если у 4-го порядка ширина 8 км, то ширину долин порядка k можно оценить как 2^{k-1} км. Полная синхронность изменений рисунка ЛВ в первых двух столбцах *рис. 3* дополнительно подтверждает, что шаг изменения ширины достаточно близок к 2, так как иначе шаг за шагом накопилось бы расхождение.

Завершим этот раздел анализом ЛВ, полученных по долинам отдельных порядков от 2 до 5, представленных в третьем столбце *рис. 3*. Как мы видим, не только для порядков 2 и 3, но и для порядка 4 сохраняется преобладание ориентировки ССЗ и появление ориентировки СВ довольно локально, а полностью смена направлений происходит только на 5-м порядке. Это означает, что долины порядков 5–9 повлияли на смену среднего направления долин порядков 4–9, а реально существенное изменение ориентировки долин начинается только с 5-го порядка. В настоящее время в LESSA нет возможности выявлять в ЦМР и анализировать долины с шириной определённого диапазона. А вот анализ в LESSA долин отдельных порядков даёт эту существенную возможность и в данном случае позволяет определить масштаб и порядок фактической смены ориентировки долин.

Анализ других регионов

Посмотрим, какие результаты даст сопоставление ЛВ штрихов и ЛВ осей долин в других регионах. Выбраны территории, на которых, судя по пику гистограммы, ожидается резкая смена ориентировки на том же масштабном шаге, что и в «Шилке» (см. *рис. 2*). Будем называть эти участки «Амур» (от горного хребта Сихотэ-Алиня до р. Буреи), 47,15–53,5° с. ш., 130,66–140,11° в.д., 717,5×719,4 км, и «Кама» (Татарстан и вокруг), 52–58° с. ш., 48–57° в.д., 617,7×683,4 км. Использованы такие же данные SRTM в проекции UTM, то же программное обеспечение и те же параметры обработки, что и для «Шилки».



Рис. 4. Сопоставление линий вытянутости штрихов и долин участка «Кама»

Результаты, полученные на участке «Амур», полностью аналогичны результатам «Шилки»: ЛВ порядков с 1-го по 5-й изменяются синхронно с ЛВ штрихов масштабных шагов с 3-го по 11-й и общий скачок направления от ССЗ-С к СВ происходит в ЛВ штрихов шага 9 и в ЛВ долин 4—7-го порядков. А значит, и здесь ширину долин порядка k можно оценить как 2^{k-1} км. К сожалению, ограничения на объём статьи не позволили привести соответствующие изображения линий вытянутости.

Отметим, что в районе «Амур», как и в «Шилке», резкое изменение ориентировки происходит у долин не 4-го, а 5-го порядка. И это важное уточнение, так как даёт соответствие с исследованием (Симонов и др., 2021), согласно которому резкое изменение ориентировки долин 4-го и 5-го порядков может быть связано с активизацией тектонических процессов и сменой структурного плана региона, что и 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. Таким образом, наш подход позволяет проследить следующую взаимосвязь: ширина долин – порядок долин – время формирования долин – время событий, которые определили направление элементов рельефа.

Добавим, что область Буреинского хребта, исследованная в прошлой статье, включена в область «Амур» и результаты, полученные там по статистике долин и по сопоставлению долин со штрихами, полностью соответствуют результатам по «Шилке».

Результаты для участка «Кама» необходимо рассмотреть подробно. Это редкая территория, на которой в исследуемом диапазоне масштабов происходит два резких изменения направления долин: при переходе к масштабному шагу 5 на небольшой территории в северной части, район р. Вятки (левый небольшой пик гистограммы на *рис. 2в*), и при переходе к шагу 9 повсеместно (второй большой пик гистограммы). Таким образом, можно будет последовательно на двух масштабах проверить синхронность смены ориентировки штрихов разного масштаба и долин определённых порядков. Отметим, что ориентировка долин на этом участке не так однородна, как в первых двух случаях, и смена ориентировки происходит в разных местах по-разному.

Подробно рассмотрим на *рис. 4* (см. с. 147) соответствие ЛВ по штрихам (левый столбец) и по долинам нескольких порядков (средний столбец). В первой строке (шаг 3 и порядки 1–9) рисунок ЛВ очень сходный, особенности рисунка в ЮЗ-углу одинаковы. Во второй строке (шаг 5 и порядки 2–9) в обоих столбцах одинаковое изменение в центре северной части (по обе стороны р. Вятки): западнее Вятки направление СВ меняется на В, а восточнее — СВ на С. Это изменение и образует меньший пик в гистограмме. В третьей строке (шаг 7 и порядки 3–9) в обоих столбцах наблюдается синхронное изменение направления ЛВ без большого числа скачков. В четвёртой строке (шаг 9 и порядки 4–9) в обоих столбцах видим одинаковые изменения: на участке западнее Вятки возвращается направление СВ, а в южной части территории направление С изменяется на В. Эти изменения образуют больший пик в гистограмме. В пятой строке (шаг 11 и порядки 5–9) в обоих столбцах продолжается синхронное изменение направления в южной части с С на В.

Рассмотрим ЛВ по долинам отдельных порядков в правом столбце *рис. 4.* Как и на других территориях, изменение направления, которое мы отметили для долин порядков 4–9 (4-я строка), фактически происходит не на 4-м, а на 5-м порядке. А вот изменения, отмеченные для долин порядка 2–9 (2-я строка), происходят уже и у долин 2-го порядка.

Таким образом, закономерности, которые мы описали для территории «Шилка», подтвердились ещё на двух совершенно иных территориях, причём на территории «Кама» удалось использовать в качестве «контрольных точек» два последовательных изменения направления долин.

Выводы

Линии осей долин, построенных в ГИС алгоритмом моделирования процесса стока по SRTM (первые 5 порядков, разрешение 65 м/пиксель, порог по площади водосбора 200 пикселей), сравнивались с линейкой долин разного масштаба, построенных с помощью технологии LESSA по той же ЦМР. Базовая ширина долин (штрихов), полученных в LESSA, составляет $0,5\sqrt{2}^{n-1}$ км на шаге *n*, где n = 1, 2, ..., 12. В результате сравнения на трёх различных территориях (площадью по 0,4 млн км²) получена ориентировочная оценка для ширины долин порядка $k, 2^{k-1}$ км. Ширина отдельных долин может существенно варьироваться вокруг этих значений. Оценка получена как за счёт сопоставления ориентационной статистики долин, так и прямым сопоставлением линий долин и штрихов на участке «Шилка». Параметры этой оценки необходимо уточнять.

Это соотношение для ширины дополняет и хорошо вписывается в остальные закономерности, известные для долин последовательных порядков. На участке «Шилка» получено, что число долин $\propto 4,47^{-k}$, а средняя длина долин $\propto 2,15^k$.

Важный результат данного исследования состоит и в том, что представлена возможность статистического анализа с помощью LESSA линий долин, построенных в ГИС. ЛВ по группе порядков мало отличается от ЛВ штрихов соответствующего масштаба, но вот анализ долин одного порядка существенно дополнит прямой анализ ЦМР в LESSA, так как пока в LESSA нет возможности анализировать долины определённого узкого диапазона ширины.

Предложенный совместный анализ ЦМР и в ГИС, и в LESSA позволяет сочетать результаты статистического анализа с известными методами анализа порядков долин и порядковых поверхностей, для которых возможно установить время их заложения и связь с определёнными тектоническими событиями. Так, для участка «Амур» (Симонов и др., 2021) резкая смена ориентировки между долинами 4-го и 5-го порядков связана со сменой структурного плана региона, которая, вероятнее всего, была синхронна с плиоценовым базальтовым вулканизмом. Таким образом, к общему пониманию того, что у более древних долин выше порядок и больше ширина, исследования данного рода, возможно, добавят более определённое соотношение масштаба (ширины) долины и времени её заложения.

Намечаются три направления дальнейших исследований. Первое — методическое. Необходимо понять, какие сочетания параметров анализа: порядок долин, порог на площадь водосбора, разрешение растрирования тальвегов, окно расчёта статистики — позволяют получить значимые результаты. Второе направление — дальнейшее расширение разнообразия рассмотренных с этой точки зрения территорий: территории, где общее изменение направлений происходит на младших порядках (южные притоки Амазонки); где изменение направлений происходит постепенно на разных масштабах (Испания); территории другого ранга (Русская равнина). И наконец, самое интересное. Выбираем участок Земли, для которого другим исследователям удалось установить, в какое время закладывались долины и поверхности определённого порядка. По SRTM определяем, каков «формальный» порядок этих долин. А значит, получаем связь в этом месте «формального» порядка долины со временем её заложения. Можно получить интересную статистику, проделав такой анализ по тем участкам, где уже установлена связь порядка долин со временем их заложения.

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

Литература

- 1. 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.
- 2. Златопольский А.А. Получение ориентационных характеристик территории с помощью технологии LESSA. Методика и тестирование на цифровой модели рельефа Предбайкалья // Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 98–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-98-110.

- 3. Златопольский А.А., Симонов Д.А., Захаров В.С. Порядковая статистика долин длина, ширина, направление (на примере Буреинского хребта) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 97–107.
- 4. Нугманов И. И., Нугманова Е. В., Чернова И. Ю. Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур. Казань: Казан. 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. Москов. 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. М.: Гос. изд-во иностр. лит-ры, 1948. 158 с.

Relationship between order and width of valleys automatically found using a digital terrain model

A.A. Zlatopolsky¹, V.A. Zaitsev²

 ¹ Space Research Institute, Moscow 117997, Russia E-mail: aazlat@gmail.com;
² Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia E-mail: v.zaitsev@mail.ru

It is proposed to continue the publication of the results of the study that estimates width of valleys of the same order. Three large regions Amur, Shilka and Kama (0.4 million sq. km each) are used. Valley axes are detected from a digital terrain model (DTM) by standard GIS tools. The width of a valley (the local distance between the ridges bounding the valley) is determined using the LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) tool, which detects in DTM valleys with width greater than specified (stripes). The average width of the valleys of the order *k* is approximately estimated as 2^{k-1} km. This estimation was obtained both by comparing the orientation statistics of valleys and stripes and by directly comparing the lines of valleys and stripes on the Shilka region. Other ratios were obtained for this region: the number of valleys $\propto 4.47^{-k}$, the average length of valleys $\propto 2.15^k$. These patterns are maintained at least for the valleys of the first five orders and are close in meaning to the Horton relations, except that we consider a region rather than a separate river system and valley axes rather than existing streams. The possibility of LESSA statistical analysis of the valley lines detected in GIS is shown, which compliments the direct analysis of DTM in LESSA. The special scales of DTM analysis found earlier, at which the average direction of stripes sharply changes, now correlate with valleys of certain orders. The layout of the valleys of these orders may be associated with specific tectonic events.

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

Accepted: 30.11.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-141-151

References

- 1. 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.
- Zlatopolsky A.A., Using LESSA technology to obtain territory orientation characteristics. Methodology and testing using digital elevation model for the pre-Baikal region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 98–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-98-110.

- 3. Zlatopolsky A.A., Simonov D.A., Zakharov V.S., Ordinal statistics of valleys: length, width, direction (applied to Bureya ridge), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 97–107 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-97-107.
- 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.