

## Порядковая и масштабная статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа

А. А. Златопольский<sup>1</sup>, Е. А. Шекман<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия  
E-mail: shekman.e@gmail.com*

Развитие ГИС-технологий и появление широкодоступных пространственных геоданных создали новые возможности для анализа моделей речных систем (М-сетей, состоящих из М-долин). Представлены результаты разработки и тестирования нового подхода к анализу М-сетей, при котором они делятся на участки с определённой площадью водосбора — М-диапазоны. Эксперименты на большой территории в бассейне Амура показали, что М-диапазоны подчиняются тем же закономерностям Хортонa, что и М-долины одного порядка. Оказалось, что при задании адекватного интервала значений площади водосбора М-диапазон состоит преимущественно из тех же фрагментов М-сети, что и М-долины соответствующего порядка, и имеет аналогичные статистические характеристики: плотность, число и среднюю длину долин, а также их локальную среднюю ориентацию. Показано, как разбиение на М-диапазоны может заменить разбиение на порядки при определении средней локальной ориентации долин. Причём, в отличие от порядковых М-долин, можно прямо задать М-диапазоны необходимого масштаба и интервала, не занимаясь выбором алгоритма определения порядка, порога на площадь водосбора первого порядка и номера порядка. Представляется, что М-диапазон может оказаться полезен при построении базисных поверхностей, а также при поиске прямой связи между масштабом (площадью водосбора) и возрастом долин. Приведён пример такого сопоставления для рассмотренной территории. Представлена модификация закона Хортонa относительно плотности М-долин для тех случаев, когда интервал площади водосбора М-диапазона существенно отличается от коэффициента Хортонa. Для большинства приведённых измерений было достаточно раstra со значениями площади водосбора и не требовалось строить описание М-сети в виде графа.

**Ключевые слова:** ЦМР, расчёт сети долин, порядок долин, статистические характеристики долин, соотношения Хортонa, масштабный фактор

Одобрена к печати: 10.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-125-134

### Введение

Благодаря предложенному Р. Е. Хортоном (Horton, 1948) делению водотоков гидросети на порядки разного уровня в зависимости от их удалённости от истоков стало возможным, в частности, численно описать очевидные закономерности: чем дальше от истоков расположены водотоки, тем больше их масштаб (площадь водосбора, длина и т. п.), тем реже они встречаются и др. Система порядков позволила вручную статистически проанализировать характеристики водотоков и найти численные закономерности: как от порядка к порядку меняются средние значения этих характеристик. Оказалось, что закон их изменения — степенной, и для разных характеристик были найдены основания степени — коэффициенты Хортонa. Прошло полвека, и исследование с помощью ГИС-моделирования (ГИС — геоинформационные системы) сетей тальвегов (линий водотоков), построенных по цифровым моделям рельефа (ЦМР) обширных территорий, позволило уточнить коэффициенты Хортонa. Эти коэффициенты оказались одинаковыми для различных крупных бассейнов, а также была обнаружена прямая взаимосвязь между средними характеристиками водотоков (Pelletier, 1999).

В отличие от исследований вручную ГИС-анализ позволяет напрямую учитывать масштаб отдельных водотоков и за счёт этого от относительных закономерностей перейти к уравнениям Хортонa, которые дают оценку средних значений характеристик водотоков заданного масштабного уровня (Златопольский, Шекман, 2022).

Система порядков «накладывается» на гидросеть, разделяя водотоки на группы одного масштабного диапазона (один порядок). В настоящей статье мы хотим привести результаты проверки выдвинутого в упомянутой нашей публикации предположения, что именно общий масштабный диапазон определяет характеристики группы водотоков и неважно, как именно выбрана эта группа — с помощью системы порядков или как-то иначе. Изложение начнём с описания структуры общепринятого ГИС-алгоритма построения водотоков, который представлен, например, в работе (Гарцман и др., 2015). Затем на примере территории в бассейне Амура сопоставим статистические характеристики водотоков, разделённых на группы, как системой порядков Хортона, так и непосредственно диапазонами значений площади водосбора. Отметим, что мы анализируем не отдельный бассейн, а территорию, включающую фрагменты нескольких бассейнов. Порядковые характеристики водотоков именно этой территории подробно исследованы в нашей предыдущей публикации.

## Структура М-сети, термины

Для аккуратного представления результатов анализа кратко опишем операции использованного ГИС-алгоритма моделирования гидрографической сети и те его промежуточные результаты, которые нам понадобятся. Чтобы помнить, что речь идёт не о реальных гидросетях и долинах, называем сети водотоков, автоматически построенные по модели рельефа, М-сетями, состоящими из М-долин.

Исходная ЦМР представлена в виде растра. На первом шаге для получения поверхности с непрерывными линиями тока в ЦМР «заполняются» бессточные понижения. Затем для каждого пикселя определяется направление стока из него (8 направлений) и путём моделирования процесса стока формируется растр стока, в котором для каждого пикселя указана площадь его водосбора (в пикселях). Из дальнейшего анализа исключаются пиксели, в которых площадь водосбора не превышает заданный пользователем порог. В результате получается растровое представление М-сети.

Далее происходит переход от растрового представления М-сети к её описанию в виде графа, состоящего из узлов и сегментов. Узлы графа отражают места слияния водотоков, а сегментами в ГИС-документации принято называть участки М-сети между этими узлами. Несколько сегментов (возможно больше двух) входят (втекают) в узел и один — выходит (вытекает) из него. Все узлы и сегменты нумеруются. Сегменты векторизуются и определяется длина векторов. Сегментам присваивается номер порядка по правилу Хортона–Стралера: первый порядок присваивается истокам, а сегмент порядка  $k + 1$  образуется при слиянии сегментов порядка  $k$ . М-долина — это связная цепочка сегментов, которая обрывается, если у конечного узла крайнего сегмента нет выходящего сегмента или у выходящего сегмента больший порядок. Номер порядка записывается в каждый пиксель сегмента, в результате чего получается растр порядков.

## Статистические характеристики М-сетей. Законы Хортона

Приведём упомянутые выше законы Хортона, которые связывают между собой средние статистические характеристики группы участков М-сети, М-долин одного порядка. Основная характеристика, на которую мы будем опираться как на показатель масштаба участка М-сети, — это площадь водосбора  $A$  (в км<sup>2</sup>). Перечислим характеристики М-сети, которые будем использовать:  $D$  — плотность, т. е. суммарная длина участков, отнесенная к площади изучаемой территории (в км/км<sup>2</sup>);  $N$  — среднее число участков на 1 км<sup>2</sup>;  $L$  — средняя длина участков  $L = D/N$  (в км). Используем показатель числа и длины на 1 км<sup>2</sup> для того, чтобы можно было сопоставлять результаты по территориям разного размера.  $W$  — средняя ширина долин, которая здесь понимается как локальное расстояние между водоразделами, ограничивающими долину. Эту нестандартную характеристику удалось оценить (Златопольский, 2022) с помощью ориентационного анализа, о котором речь пойдёт ниже.

Обратим внимание, что все приведённые далее эмпирические соотношения этих характеристик справедливы только для значений в указанных выше размерностях.

Отношения Хортона фиксируют тот эмпирический факт, что средние значения характеристик от порядка к порядку изменяются как степенная функция с постоянным мультипликативным шагом — коэффициентом Хортона  $R$ . Величина этого шага для каждой характеристики своя, но одинакова для различных территорий. Мы ориентируемся на значения коэффициентов, приведённые в работах (Pelletier, 1999; Wang et al., 2022):  $R_A = 4,6$ ;  $R_N = 0,2273$  (чаще используют обратную величину — коэффициент бифуркации);  $R_D = 0,5$ ;  $R_L = 2,2$ , а также на нашу оценку  $R_W = 2$ .

Представим законы Хортона, описанные в публикации (Златопольский, Шекман, 2022), в наиболее удобной для нашего исследования форме — без прямого указания номера порядка:

$$N = \frac{0,5775}{A^{0,97}}, \quad D = \frac{0,5245}{A^{0,45}}, \quad L = 0,91A^{0,52}, \quad W = 0,74A^{0,45}. \quad (1)$$

Порядковая структура всё же присутствует в уравнениях тем, что расчёт средних значений характеристик ведётся по долинам одного порядка. Ниже мы это обстоятельство учтём. Средняя площадь водосбора для М-долин порядка  $k$  оценивается в указанной работе как  $A = 0,5SR_A^k$ , где  $S$  (в км<sup>2</sup>) — упомянутый выше порог на площадь водосбора для М-долин первого порядка. Шаг между значениями средней площади последовательных порядков —  $R_A$ . При этом, как показали измерения, реальный разброс возможных значений площади водосбора  $A$  у М-долин одного порядка чуть ли не вдвое больше, чем  $R_A$ , т. е. интервалы возможных значений этой характеристики М-долин у последовательных порядков существенно перекрываются.

Обратим внимание, что в силу степенного характера зависимостей выражения «середина диапазона», «часть диапазона» и другие подобные нужно понимать в логарифмическом смысле: если начало диапазона —  $A$ , а величина диапазона —  $F$ , то конец диапазона —  $AF$ , половина диапазона —  $\sqrt{F}$ , значение в середине диапазона —  $A\sqrt{F}$  и т. п.

Сейчас можем конкретнее сформулировать нашу задачу. Рассмотрим два способа выбора участков М-сети: М-долины порядка  $k$  и М-диапазон с номером  $k$ . М-диапазоном будем называть все участки М-сети с площадью водосбора из определённого интервала значений. Чтобы получить М-диапазон с номером  $k$ , сопоставимый с М-долинами порядка  $k$ , интервал его значений задаём вокруг средней площади водосбора соответствующего порядка — все пиксели раstra стока с площадью водосбора от  $0,5SR_A^{k-1/2}$  до  $0,5SR_A^{k+1/2}$ .

Собственно, и при использовании порядков подспудно «работает» площадь водосбора, но во втором случае диапазоны задаются явно и они не перекрываются. Конечно, мы не получим полного совпадения этих двух вариантов выбора участков М-сети, но мы хотим проанализировать, насколько статистически сходны участки, которые выделяются этими способами, насколько при выборке по диапазону работают законы и соотношения Хортона. А также может ли в каких-то ситуациях выборка по диапазону заменить выборку по порядку. Рассчитываем на это в силу того, что в обоих случаях мы делим на части одну и ту же М-сеть, хотя и несколькими способами.

### Сопоставление плотности фрагментов М-сети, полученных по диапазонам площади водосбора и по порядкам

Сравним представленные подходы на примере большой территории — от горной системы Сихотэ-Алинь до р. Буреи, 47,15–53,5° с. ш. и 130,66–140,11° в. д., 717,5×719,4 км, площадь суши — 502 663 км<sup>2</sup>. Если исследовать территорию на порядки меньшей площади, то средние значения характеристик М-сети будут существенно зависеть от локальных особенностей, а кроме того, не обеспечивается достаточная выборка для статистического анализа М-долин высоких порядков. В нашем случае есть М-долины 9-го порядка, но уже М-долин 6-го порядка

маловато, только 106, поэтому приводим результаты по первым 6 порядкам. Нами использована достаточно надёжная и доступная для многих территорий модель рельефа SRTM (англ. Shuttle Radar Topographic Mission). Для сопоставимости с результатами анализа этой территории, которые представлены в предыдущих статьях (Златопольский, 2022; Златопольский, Шекман, 2022), параметры анализа ЦМР сохранены прежними: ЦМР в универсальной поперечной проекции UTM (англ. Universal Transverse Mercator) с разрешением 65,1 м/пиксель, порог на площадь водосбора при расчёте порядков — 200 пикселей, т. е.  $S = 0,85 \text{ км}^2$ .

Посмотрим, как соотносятся характеристики М-долин одного порядка и соответствующего М-диапазона. Из описанных характеристик в ГИС наиболее аккуратно определяется суммарная длина водотоков, их средняя плотность по территории. Расчёт суммарной длины М-долин по растру и по векторным данным графа дают чрезвычайно близкий результат.

Таблица 1. Плотность М-долин порядка  $k$  и в М-диапазоне с номером  $k$

$k$	1	2	3	4	5	6
Средняя площадь водосбора М-долины порядка $k$ , км <sup>2</sup>	1,955	8,993	41,368	190,292	875,343	4026,576
Плотность М-долин порядка $k$ по формуле (1), км/км <sup>2</sup>	0,38791	0,1952	0,098231	0,049432	0,024875	0,012518
Плотность М-долин порядка $k$ , расчёт, км/км <sup>2</sup>	0,39144	0,1927	0,096946	0,044522	0,024161	0,011798
Плотность М-диапазона $k$ , расчёт, км/км <sup>2</sup>	0,36852	0,1941	0,098603	0,044502	0,021726	0,012
Отношение плотности М-диапазона $k$ к плотности по формуле (1)	0,9498	1,0006	1,0165	0,9176	0,8959	0,9897
Отношение плотности М-диапазона $k$ к плотности М-долин порядка $k$	0,9545	0,9909	1,003	0,988	0,8918	1,0087
Отношение плотности М-диапазона $k + 1$ к плотности М-диапазона $k$	0,5268	0,5079	0,4513	0,4882	0,5523	

Из табл. 1 мы видим, что плотность у сконструированных М-диапазонов соответствует закону Хортона не хуже, чем у М-долин одного порядка. При том что интервалы значений площади водосбора мы не подбирали, а установили исходя из уравнений и отношений Хортона. Обратим также внимание, что шаг изменения плотности между М-диапазонами близок к коэффициенту Хортона  $R_D = 0,5$ . Величина этого шага изменяется не очень существенно и в среднем составляет 0,505.

Цель настоящей публикации — показать возможность работы с М-диапазонами и сопоставить их с разделением М-долин на порядки. Но важно помнить, что в отличие от системы порядков М-диапазоны можно задавать произвольного размера и любого положения на шкале значений, причём совсем не обязательно задавать линейку диапазонов, можно сформировать отдельный диапазон.

Эти возможности мы рассмотрим в дальнейших исследованиях, а здесь обратим внимание на следующее обстоятельство. Вернёмся к уравнениям (1). Как мы видим, интервал значений площади водосбора, который мы использовали (изменение в  $R_A$  раз), даёт хорошее соответствие с формулой плотности для порядков. Но если мы существенно изменим интервал, то изменим и число выбранных фрагментов, а значит, и плотность должна измениться соответственно (логарифмически, учитывая степенной характер отношений). Для интервала значений  $F$  (от  $A/\sqrt{F}$  до  $A\sqrt{F}$ ) получим формулу  $D = (\lg F / \lg R) \cdot (0,5245 / A^{0,45})$ . В качестве примера рассмотрим диапазоны с другими центрами  $A_k = 0,5SR_A^{k/2+1/4}$  и границами  $0,5SR_A^{k/2}$ , которые разбивают прежние первые четыре диапазона пополам (логарифмически),  $F = \sqrt{R_A}$ . В табл. 2 представлены плотности:  $D_k$  — измеренная в М-диапазонах и  $D_k^c$  — полученная по модифицированной формуле. Значения этих плотностей хорошо совпадают. Отметим, что

шаг изменения средней площади в  $\sqrt{R_A}$  раз порождает шаг изменения средней плотности в  $\sqrt{R_D} = 0,707$  раз (в среднем получилось 0,703).

Таблица 2. Измеренная и рассчитанная плотность М-сети для узких интервалов

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8
$A_k$	1,3349	2,8631	6,1407	13,1702	28,2470	60,5831	129,936	190,291
$D_k^c$	0,2303	0,1633	0,1154	0,0822	0,0583	0,04137	0,02934	0,02081
$D_k$	0,2125	0,1559	0,1131	0,08105	0,05852	0,04013	0,02657	0,01798
$D_k^c/D_k$	1,0838	1,048	1,0243	1,0143	0,9964	1,0309	1,1043	1,1574
$D_{k+1}/D_k$	0,7336	0,7258	0,7164	0,7221	0,6857	0,6622	0,6768	

### Прямое сопоставление фрагментов М-сети, полученных по диапазонам площади водосбора и по порядкам

По суммарной длине (плотности) оба варианта участков М-сети оказались близки. Теперь непосредственно сопоставим растры участков М-сети, которые получаются при двух описанных способах выбора. Растр порядка  $k$  получается из растра всех порядков стиранием пикселей других порядков. А растр диапазона  $k$  получается из растра стока стиранием всех пикселей, значения площади водосбора в которых не попадают в заданный интервал.

Накладывая друг на друга соответствующие растры диапазона и порядка, посмотрим, какое число пикселей М-сети в них перекрывается. Для первых шести диапазонов ( $k$  от 1 до 6) приводим пары значений, где первое — это процент «перекрытых пикселей» у растра диапазона, а второе — у растра порядка:

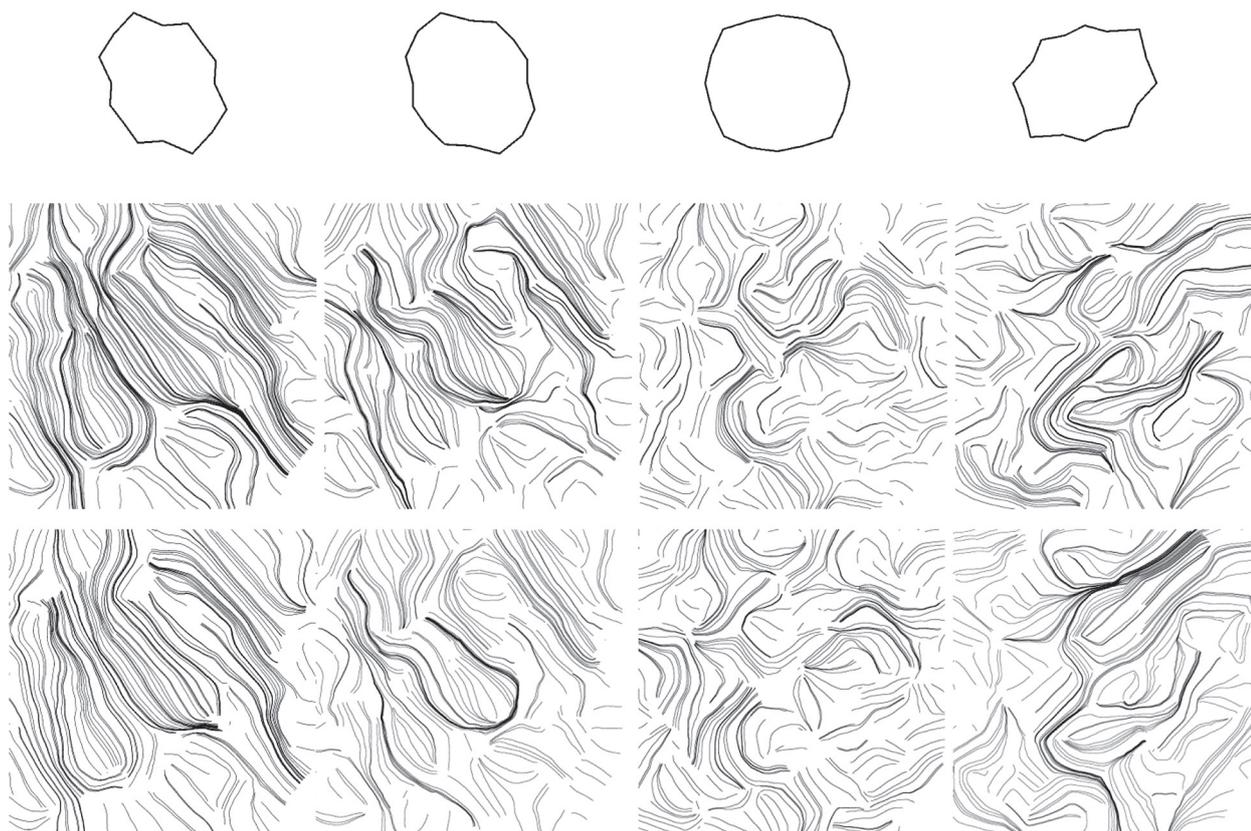
$$(90,8 \ 86,6); (75,6 \ 74,9); (74,1 \ 74,3); (73,5 \ 72,6); (78,3 \ 69,8); (70 \ 70,6).$$

Итак, участки М-сетей, выбранные различным способом, совпадают довольно хорошо. Посмотрим на примере М-диапазонов 2, 3 и 4, как именно с растром М-диапазона перекрываются растры М-долин последовательных порядков. Перекрытие М-диапазона  $k$  с М-долинами порядка  $(k - 1)$  — 15 %, с М-долинами порядка  $k$  — 74 %, с М-долинами порядка  $(k + 1)$  — 11 %. В свою очередь, М-долины порядка 3 перекрываются с М-диапазоном 2 в 20 %, с М-диапазоном 3 — в 74 %, с М-диапазоном 4 — в 6 %.

Как видим, М-долины одного порядка и участки соответствующего М-диапазона не просто статистически сходны, а состоят в основном из одних и тех же частей М-сети.

### Сопоставление среднего локального направления фрагментов М-сети, полученных по диапазонам площади водосбора и по порядкам. Ширина и возраст долин

Выясним, насколько схожи не общие для всей территории, а локальные статистические характеристики М-сети у М-диапазона и М-долин одного порядка: их средняя локальная ориентация. Эти данные по растрам М-сетей получаем в скользящем круглом окне с помощью программного комплекса WinLESSA (Златопольский, 2020). В нём по растровым данным можно рассчитать локальную плотность М-сети, общую и локальные розы-диаграммы, среднее направление вытянутости роз-диаграмм (в диапазоне 180°) и многие другие характеристики. Векторы локального среднего направления вытянутости объединяются в линии вытянутости, которые наглядно отражают распределение преимущественных направлений по территории (рисунки, см. с. 130). Чтобы измерять характеристики немногочисленных М-долин высоких порядков (4 и 5), диаметр окна должен быть большим — 90 км (выбор этого размера поясняется в работе (Златопольский, 2022)).



Розы-диаграммы (верхний ряд) и линии вытянутости (средний ряд) для М-долин 2–5-го порядков; линии вытянутости для соответствующих М-диапазонов (нижний ряд)

На рисунке представлены ориентационные характеристики М-долин 2–5-го порядков и соответствующих М-диапазонов. В верхней строке — розы-диаграммы для разных порядков по всей территории. Для М-диапазонов эти розы такие же. Хорошо видно, что средняя ориентация в младших порядках в основном северо-западная, на 4-м порядке появляется и северо-восточное направление, которое в 5-м становится преимущественным. В средней строке приведены линии вытянутости, которые показывают локальную среднюю ориентацию М-долин каждого порядка, а в нижней строке — линии вытянутости для М-диапазонов. Наблюдаемое высокое сходство соответствующих линий вытянутости, их «синхронное» изменение показывают, как близки по существу выборки по порядку и по диапазону.

Подобную «линейку» рисунков линий вытянутости для элементов рельефа разного масштаба можно рассчитать для разных дистанционных данных одной территории. Если есть явное изменение ориентации при переходе к каким-то масштабам, то это позволяет синхронизировать эти линейки, т. е. зафиксировать, когда в них происходит анализ одинаковых масштабов. Так, в работе (Златопольский, Зайцев, 2021) изменения линий вытянутости, рассчитанных по М-долинам последовательных порядков, удалось соотнести с изменениями линий вытянутости, рассчитанных по рельефу при смене масштаба анализа. Масштаб анализа рельефа менялся за счёт изменения минимально различимой ширины долины (определение ширины долины дано выше). В результате такой синхронизации для порядковых М-долин была получена формула средней ширины долины  $W = 0,74A^{0,45}$ . Поскольку ориентация М-диапазонов практически неотличима от М-долин, а средний водосбор,  $A$ , для них одинаков, то, следовательно, эта формула сохраняется и для М-диапазонов.

И ещё одно направление исследований. В геологической методике анализа базисных поверхностей (например, (Симонов и др., 2021)) принято считать, что М-долины одного порядка на анализируемой территории имеют один возраст заложения. Учитывая, что М-долина некоторого порядка и соответствующий М-диапазон не только состоит в основном из одних

и тех же частей М-сети, но и сходны статистически, можно и относительно М-диапазона предположить, что у входящих в него участков М-сети одно время заложения.

Представляется важным попробовать установить связь между масштабом М-диапазона (средней площадью водосбора) и возрастом входящих в него долин. Для этого достаточно определить площадь водосбора долин с установленным возрастом. В частности, относительно рассматриваемой территории в указанной выше работе есть предположение, что резкая смена ориентировки при переходе от М-долин 5-го порядка к М-долинам меньшего масштаба связана со сменой структурного плана региона, которая, вероятнее всего, была синхронна с плиоценовым базальтовым вулканизмом. Поскольку ориентировка М-диапазонов та же, что у порядков, можно соотнести соответствующую среднюю площадь водосбора долин (около 875 км<sup>2</sup>) с их возрастом (заложение в плиоцене).

### Сопоставление числа и средней длины М-долин, полученных по диапазонам площади водосбора и по порядкам

Отметим, что для анализа М-диапазонов пока не требовалось использовать их описание в виде графа, хватало раstra. Для получения следующих характеристик необходимо разделить участки М-диапазона на фрагменты — долины, аналогичные порядковым М-долинам. Такая долина будет складываться из последовательности сегментов одного диапазона и обрываться, если её крайний сегмент «сливается» с сегментом большего водосбора или если сегмент, следующий после крайнего узла, относится к другому диапазону. Сегмент целиком относится к тому или иному диапазону в соответствии с площадью водосбора в его конце. В силу такой недостаточной детальности первые два М-диапазона, построенные из сегментов, несколько отличаются от М-диапазонов, определённых попиксельно. И всё же число долин диапазона, построенных предложенным образом, оказывается довольно близко к числу М-долин по формуле (1). А число долин последовательных диапазонов изменяется с шагом 0,239, который близок к  $R_N = 0,2273$  (табл. 3).

Таблица 3. Числа М-долин порядка  $k$  и в М-диапазоне с номером  $k$

$k$	1	2	3	4	5	6
Число М-долин прядка $k$ на 1 км <sup>2</sup> по формуле (1)	0,3035	0,069	0,01568	0,00356	0,00081	0,000184
Число М-долин порядка $k$ на 1 км <sup>2</sup>	0,3039	0,0664	0,015	0,00353	0,000774	0,000211
Число долин диапазона $k$ на 1 км <sup>2</sup>	0,25124	0,06270	0,01497	0,00331	0,000657	0,000195
Отношение числа долин диапазона $k$ к их числу по формуле (1)	0,828	0,909	0,955	0,928	0,811	1,059
Отношение числа долин диапазона $k + 1$ к числу долин диапазона $k$	0,2496	0,2388	0,2203	0,1987	0,2967	

Таблица 4. Средняя длина М-долин порядка  $k$  и в М-диапазоне с номером  $k$

$k$	1	2	3	4	5	6
Средняя длина М-долин порядка $k$ по формуле (1), км	1,28	2,816	6,1952	13,62944	29,9848	65,9665
Средняя длина М-долин порядка $k$ , км	1,288	2,9	6,463	12,622	31,22	55,945
Средняя длина долин диапазона $k$ , км	1,467	3,096	6,5857	13,4595	33,094	61,549
Отношение средней длины долин диапазона $k$ к длине по формуле (1)	1,208	1,1001	1,047	1,0776	1,2334	0,9439
Отношение средней длины долин диапазона $k + 1$ к их длине в диапазоне $k$	2,1107	2,1271	2,0438	2,4588	1,8598	

Разделив приведённую ранее плотность М-диапазона на полученное удельное число долин, найдём среднюю длину долин диапазона. Значения и этой характеристики М-диапазона неплохо соответствуют формуле (1), да и средний шаг изменения 2,11 близок к соответствующему коэффициенту Хортона — 2,2 (табл. 4).

## Выводы

Приведённые результаты экспериментов показывают, что фрагменты М-сети одного масштаба, а точнее с определённой площадью водосбора, названные нами М-диапазонами, подчиняются тем же закономерностям Хортона, что и М-долины одного порядка. Если интервал значений площади водосбора для М-диапазона задан в соответствии с площадью водосбора М-долин некоторого порядка, то измеренные в М-диапазоне статистические характеристики — плотность, число и средняя длина долин, их локальная средняя ориентация — близки к характеристикам М-долин этого порядка. Собственно, такой М-диапазон и состоит преимущественно из тех же фрагментов М-сети, что и М-долины соответствующего порядка.

Деление на М-диапазоны может в ряде ситуаций заменить деление на порядки. Так, как мы видели, М-диапазоны можно использовать для определения средней локальной ориентации долин интересующего масштаба.

В отличие от порядковых М-долин для М-диапазонов можно прямо указать интересующие масштабы и не заниматься довольно нетривиальным выбором алгоритма задания порядка, порога на площадь водосбора первого порядка (который многое определяет, но редко указывается в публикациях) и номера порядка. Только нужно следить, чтобы масштабный интервал включал достаточное для статистического анализа число долин.

Правда, в отличие от разбиения на порядки требуется использовать компьютерные технологии анализа ЦМР. Отметим, что для большинства приведённых измерений было достаточно рассчитать растр стока со значениями площади водосбора и не требовалось строить описание в виде графа.

Данная публикация только намечает предложенный подход, и требуется дальнейший аккуратный анализ характеристик М-диапазонов в различных ситуациях.

Так, в первую очередь необходимо будет определить, как модифицируются формулы законов Хортона для М-диапазона, если его интервал отличен от коэффициента Хортона  $R_A$ . Пример такой модификации приведён в настоящей работе для формулы плотности М-долин.

Важно проверить предположение о том, что в силу большей гибкости задания масштаба анализа М-диапазон может оказаться полезнее порядковых М-долин при построении базисных поверхностей.

Возможно, удастся набрать достаточно случаев уверенного определения времени заложения долин, чтобы нащупать прямую связь между масштабом (площадью водосбора) и возрастом долины. Здесь мы рассмотрели пример такого сопоставления: средняя площадь водосбора долин (около 875 км<sup>2</sup>) и их возраст (заложение в плиоцене).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8).

## Литература

1. Гарцман Б. И., Бугаец А. Н., Тегай Н. Д., Краснояев С. М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // Речные системы Дальнего Востока России: четверть века исследований. Владивосток: Дальнаука, 2015. С 265–278.
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. Порядковая статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа. Базовый расчёт и приведённый порядок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 133–142. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-133-142.
4. Златопольский А. А., Зайцев В. А. Соотношение порядка и ширины долин, автоматически найденных по цифровой модели рельефа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 141–151. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-141-151.
5. Златопольский А. А., Шекман Е. А. Порядковая статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа. Масштабный фактор и уравнения Хортон // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 113–122. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-113-122.
6. 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. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2021-5-19-30>.
7. Хортон Р. Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии / пер. с англ. Д. Л. Арманд, В. А. Троицкого; под ред. М. А. Великанова. М.; Л.: Изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.
8. Pelletier J. D. Self-organization and scaling relationships of evolving river networks // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. No. B4. P. 7359–7375.
9. Wang K., Zhang L., Li T., Li X., Guo B., Chen G., Huang Y., Wei J., Side Tributary Distribution of Quasi-Uniform Iterative Binary Tree Networks for River Networks // Frontiers in Environmental Science. 2022. V. 9. Art. No. 792289. DOI: 10.3389/fenvs.2021.792289.

## Ordinal and scale statistics of valleys found by digital terrain model

A. A. Zlatopolsky<sup>1</sup>, E. A. Shekman<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia  
E-mail: shekman.e@gmail.com

The development of GIS technologies and the emergence of widely available spatial geodata have created new opportunities for the analysis of river system models (M-networks consisting of M-valleys). The article presents the results of the development and testing of a new approach to the analysis of M-networks, in which they are divided into parts with a certain catchment area, M-bands. Experiments on a large area of the Amur basin have shown that M-bands obey the same Horton laws as M-valleys of the same order. It turned out that when an adequate interval of values of the catchment area is specified, the M-range consists mainly of the same fragments of the M-network as the M-valleys of the corresponding order and has similar statistical characteristics: density, number and average length of valleys, their local average orientation. It is shown how partitioning into M-bands can replace partitioning into orders, for example, when determining the average local orientation of valleys. Moreover, in contrast to ordinal M-valleys, one can directly set the M-ranges of the required scale and interval without choosing the algorithm for determining the order, the threshold for the catchment area of the first order, and the order number. It seems that the M-range can be useful in constructing reference surfaces, as well as in searching for a direct relationship between the scale (catchment area) and the age of the valleys. An example of such a comparison for the considered territory is given. A modification of Horton's law for the density of M-valleys is presented for the case when the interval of the catchment area of the M-range differs significantly from the ordinal one. For most of the given measurements, a raster with the values of the catchment area was sufficient, and it was not required to build a description of the M-network in the form of a graph.

**Keywords:** DTM, valley network calculation, valley order, statistical characteristics of valleys, Horton ratios, scale factor

Accepted: 10.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-125-134

## References

1. Gartsman B. I., Bugaets A. N., Tegai N. D., Krasnopyev S. M., Analysis of the structure of river systems and the prospects for modeling hydrological processes, In: *Rechnye sistemy Dal'nego Vostoka Rossii: chetvert' veka issledovaniy* (River system of Pacific Russia: A quarter century of research), Vladivostok: Dalnauka, 2015, pp. 265–278 (in Russian).
2. 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., Ordinal statistics of the valleys found by the digital terrain model. Basic calculation and converted order, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 133–142 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-133-142.
4. Zlatopolsky A. A., Zaitsev V. A., Relation of the order and width of the valleys automatically found by the digital terrain model, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 141–151 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-141-151.
5. Zlatopolsky A. A., Shekman E. A., Ordinal statistics of the valleys found by the digital terrain model. Scale factor and Horton's equations, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 113–122 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-113-122.
6. 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), <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2021-5-19-30>.
7. Horton R. E., Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bull. Geological Society of America*, 1945, Vol. 56, pp. 275–370.
8. Pelletier J. D., Self-organization and scaling relationships of evolving river networks, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. B4, pp. 7359–7375.
9. Wang K., Zhang L., Li T., Li X., Guo B., Chen G., Huang Y., Wei J., Side Tributary Distribution of Quasi-Uniform Iterative Binary Tree Networks for River Networks, *Frontiers in Environmental Science*, 2022, Vol. 9, Art. No. 792289, DOI: 10.3389/fenvs.2021.792289.