

Порядковая статистика долин, найденных по цифровой модели рельефа. Базовый расчёт и приведённый порядок

А. А. Златопольский

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: aazlat@gmail.com*

По цифровой модели рельефа (ЦМР) стандартным алгоритмом построены сети водотоков (называем их М-долины) для четырёх крупных территорий: «Амур», «Шилка», «Кама», «Нигер» (около 400 000 км² каждая). Во всех случаях использованы единые базовые параметры расчёта, задающие минимальную площадь водосбора 0,85 км². Оказалось, что значения средней плотности М-долин одного порядка на всех территориях очень близки (разброс значений 10 %), а отношение средней плотности М-долин последовательных порядков во всех случаях составляет около двух. Исходя из этих измерений предполагаем, что для больших территорий у М-долин первых базовых порядков, P , можно ожидать среднюю плотность $0,4/2^{(P-1)}$ км/км². Аналогичные оценки, хотя и менее надёжные, получены для среднего числа М-долин на квадратный километр — $0,27/4,4^{(P-1)}$, средней длины М-долин — $1,48 \cdot 2,2^{(P-1)}$ км и средней ширины М-долин — $2^{(P-1)}$ км. Данные формулы соответствуют отношениям Хортон для гидросетей. Возможно, близость абсолютных значений этих характеристик для столь разных территорий отражает глубинные свойства организации рельефа. Предложено, как при небазовых параметрах расчёта пересчитать порядок М-долин в «приведённый» порядок базового варианта, М-долины которого имеют аналогичные статистические характеристики. Дан пример методического использования найденных закономерностей для плотности М-долин при расчёте локальной статистики. Показано, как локальный статистический анализ М-долин отдельных порядков позволяет выявить характеристики элементов рельефа соответствующего размера. Приведён пример того, как можно связать обнаруженные статистические свойства рельефа с М-долинами определённого базового порядка, а через использование базисных поверхностей связать эти свойства с геологическими событиями определённого времени.

Ключевые слова: ЦМР, расчёт сети долин, порядок долин, статистические характеристики долин, соотношения Хортон

Одобрена к печати: 04.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-133-142

Введение

Широко используемые алгоритмы моделирования стока в ГИС (геоинформационные системы) позволяют строить сети тальвегов (линий водотоков), близкие к реальным гидрографическим сетям. Далее, чтобы отличать от сетей реальных долин, будем называть гидросети, автоматически построенные по модели рельефа, М-сетями, состоящими из М-долин. Обычно моделирование конкретной гидросети требует, чтобы М-сеть максимально ей соответствовала. Но в данной работе предлагается рассматривать М-сети в другой роли — как своеобразное описание рельефа и через статистический анализ М-сетей получать характеристики рельефа. При таком подходе важно строить М-сети геометрически аккуратно, но нет необходимости, чтобы каждая найденная М-долина соответствовала «синей линии» на карте. В первую очередь мы будем оценивать такие свойства М-сетей (а значит, и рельефа), как плотность М-долин, их длину, ширину и ориентацию.

Опираясь будем на иерархию М-долин, которую образует система порядков Хортон — Стралера, когда М-долина порядка $K + 1$ образуется при слиянии М-долин порядка K . Важно, что эта чёткая формальная иерархия ранжирует М-долины не только по положению в сети, но и по размеру (длина, ширина, площадь водосбора) и даже по возрасту заложения соответствующих элементов рельефа. Эти свойства иерархии порядков долин общеизвестны, но нам хотелось по возможности найти их численное выражение.

Исследования речных систем (например, в публикации (Pelletier, 1999)) показали, что существуют определённые соотношения между параметрами водотоков последовательных порядков. В частности, в определённое число раз меняется общая длина водотоков, их средняя длина, средняя площадь водосбора и др. Но нас заинтересовали не только соотношения характеристик разных порядков, но и абсолютные средние значения величин для каждого порядка. На сравнительно небольших территориях (скажем, 5000 км^2 и меньше) средние значения изменяются существенно, поэтому мы рассматриваем среднее на территориях, которые на два порядка больше. Отметим, что эти территории не обязательно лежат в пределах одного водосбора, одной речной системы.

Для сопоставления порядковых характеристик разных территорий необходимо единообразие анализа, поэтому будем рассматривать М-сети, построенные единым формальным алгоритмом с фиксированными параметрами, так как номер порядка конкретного элемента рельефа может существенно изменяться в зависимости от использованных параметров. Результаты исследований, проведённых с другими параметрами моделирования, предлагаем пересчитывать, т. е. «приводить» к этим базовым значениям порядка. Отметим, что важно прийти к единообразному анализу М-сетей, установить общую «точку отсчёта», а конкретные базовые параметры расчёта, предлагаемые ниже, — это только первая попытка в данном направлении.

Методика анализа. Базовые параметры расчёта М-сетей

Опишем методику расчёта М-сетей, принятую нами за базовую. Использована достаточно надёжная и легко доступная для многих территорий цифровая модель поверхности SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topographic Mission). Поскольку для нас будет критически важна ориентировка М-долин, выбрана проекция UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator, универсальная поперечная проекция Меркатора), которая сохраняет соотношение направлений на местности, хотя и вносит искажение в площадь и длину объектов.

Разрешение цифровой модели рельефа (ЦМР) и разрешающая способность алгоритма анализа должны соответствовать друг другу (Златопольский, 2014). Разрешение данных должно быть достаточным, чтобы используемый инструмент анализа не пропускал («замечал») необходимые мелкие объекты, детали. Однако нет смысла в излишне сильном укрупнении, в слишком растянутых данных. Разрешение 65 м/пиксель показало себя в этом смысле вполне адекватным, так как в этом случае хорошо выявляются тальвеги первого порядка не только при указанной ниже пороговой площади водосбора, но и при меньших порогах, что было необходимо для экспериментов. Появятся ли новые детали М-сети, если сильнее растянуть ЦМР, мы не проверяли.

М-сети строили в ГИС с помощью популярного штатного алгоритма, описанного, в частности, в работе (Нугманов и др., 2016). Для базового способа расчёта нами использованы следующие основные параметры этого алгоритма: восемь направлений стока и порог на площадь водосбора в 200 пикселей. При принятом разрешении этот порог составляет $0,85 \text{ км}^2$ и соответствует порогам, которые используются на практике. В среднем величина пороговой площади может быть оценена в $0,5\text{—}1,0 \text{ км}^2$, что отвечает средней площади водосбора первого порядка ($1\text{—}2 \text{ км}^2$) (Гарцман и др., 2015).

Статистический анализ М-сетей проводился в растре. Определяли количество М-долин каждого порядка (число связанных объектов этого порядка) и их суммарную длину. Учитывалось различие числа пикселей в растровых линиях одной длины, но разного направления. Сравнение с измерением суммарных длин в векторном формате в ГИС показало, что использованный способ измерения достаточно точен (отличие около 1 %). Для числа М-долин получаем оценку снизу, так как некоторые М-долины одного порядка «склеиваются» в общем устье и не всегда их можно разделить. Ровные участки ЦМР (например, водная поверхность) удалялись из статистического расчёта, маскировались (вручную), чтобы не учитывать многочисленные на таких участках ложные линии М-долин первых порядков.

Порядковая статистика М-долин

Рассмотрим статистические характеристики М-долин, усреднённые на больших территориях (около 400 000 км²). Размер области расчёта существенен, так как мы хотим обнаружить общие, не локальные свойства. Локальный статистический анализ, конечно, важен, интересен, и мы будем говорить о нём далее, но в данном разделе оценим общие свойства М-долин, которые, как мы предполагаем, отражают общие свойства рельефа.

Описанным выше базовым способом М-долины построены для четырёх совершенно различных территорий:

1. «Шилка» (от Аргуни до Витима) — 49,3–54,96° с. ш., 112,22–121,65° в. д.; 685,5×640 км.
2. «Амур» (от Сихотэ-Алиня до Буреи) — 47,15–53,5° с. ш., 130,66–140,11° в. д.; 717,5×719,4 км.
3. «Кама» (Татарстан и вокруг) — 52–58° с. ш., 48–57° в. д.; 617,7×683,4 км.
4. «Нигер» (Гвинея и Сьерра-Лионе) — 7–12,9° с. ш., 7,5–13,3° з. д.; 641×656,3 км.

Для каждой территории рассчитывалась плотность М-долин каждого порядка. В таблице приведена средняя для четырёх территорий плотность, разброс значений этой плотности ((максимум – минимум)/среднее) и отношение средней плотности последовательных порядков. Обратим внимание, что значения плотности, которые пересчитаны на квадратный километр, реализуются на участках в десятки и сотни тысяч квадратных километров. Порядок М-долины, полученный при базовом способе расчёта, будем обозначать P , а среднюю плотность для этого порядка — D_P .

Плотность М-долин каждого порядка

Номер базового порядка P	1	2	3	4	5
Средняя плотность D_P , м/км ²	408,9386	197,045800	97,870420	44,986600	22,318300
Разброс плотности, %	12,6660	9,318300	7,716400	13,050900	29,248300
Отношение D_{P-1}/D_P		2,075348	2,013334	2,175546	2,015682

Эти результаты говорят о следующих закономерностях.

- Плотность М-долин каждого порядка даже для столь несхожих территорий различается очень мало. Большой разброс для 5-го порядка, видимо, связан с тем, что М-долин этого порядка слишком мало для надёжной оценки.
- Плотность М-долин каждого следующего порядка меньше почти в два раза, т.е. суммарная длина М-долин каждого следующего порядка в два раза меньше, что хорошо согласуется с отношениями Хортона (Хортон, 1948) для гидросетей.

Таким образом, плотность всех М-долин сосредоточена в первых порядках и выглядит почти постоянной ($\pm 5\%$), равной $2D_1$. Видимо, в силу этого постоянства и близкого размера данных территорий максимальный порядок М-долин во всех случаях один и тот же — 9-й.

В работах по мультимасштабному анализу ЦМР (Златопольский, 2017) при совершенно ином принципе поиска долин и хребтов на столь же больших территориях было также обнаружено постоянство плотности этих элементов рельефа. Для элементов, которые по размеру соответствуют 1-му базовому порядку, плотность совместно хребтов и долин была 1,5 км/км², что хорошо соответствует полученной нами величине 0,8 км/км² для долин 1-го порядка.

Относительно плотности М-долин 1-го порядка предполагалось, что она окажется заниженной из-за того, что начала этих М-долин могут быть отрезаны порогом на площадь водосбора. Однако, как мы видим по соотношению плотностей, это предположение не реализовалось.

Для этих территорий также найдено (Златопольский и др., 2021), что ширину М-долин (локальное расстояние между водоразделами, ограничивающими долину) можно оценить как $2^{(P-1)}$ км.

Подсчёт числа М-долин одного порядка на территориях «Шилка» (Златопольский, Зайцев, 2021) и «Амур» позволил получить оценку их числа на квадратный километр — $0,27/4,4^{(P-1)}$ и исходя из неё оценить среднюю длину потоков каждого порядка — $1,48 \times 2,2^{(P-1)}$ км. Как отмечалось, число М-долин, скорее всего, несколько занижено и, соответственно, несколько завышена средняя длина.

Если предположить, что и эти характеристики М-долин сохраняются на разных территориях, то в дальнейших исследованиях на новых участках можно ожидать при базовом способе расчёта М-сетей следующие значения характеристик М-долин порядка P :

$$L_p = 1,48 \cdot 2,2^{(P-1)}, W_p = 2^{(P-1)}, N_p = 0,27/4,4^{(P-1)}, D_p = 0,4/2^{(P-1)}, \quad (1)$$

где L_p — средняя длина, км; W_p — средняя ширина, км; N_p — среднее число М-долин на квадратный километр; D_p — плотность, км/км². Плотность всех М-долин порядка P и выше — около $2D_p$, т. е. $0,8/2^{(P-1)}$ км/км².

Далее покажем, как использовать эти закономерности в том случае, когда построение М-сетей проходило не с базовыми параметрами. Для этого достаточно полученные номера порядков пересчитать в базовые.

Использованные в формулах коэффициенты — это только первое приближение, которое должно уточняться. Полученные величины отношений для характеристик разных порядков подтверждаются отношениями Хортона для гидросетей, а вот абсолютные значения (первый множитель в формуле) нужно будет проверить в первую очередь. Напомним, что пока мы можем только предположительно распространять полученные закономерности на порядки выше 4-го базового, так как для них маловато статистики. Однако, если соотношение — один поток порядка P приходится на $4,4^{(P-1)}/0,27$ км² — сохраняется при высоких порядках, то одна М-долина 9-го порядка должна приходиться на 520 305 км². У нас во всех четырёх случаях присутствует один поток высшего 9-го порядка на площади в 420496–516960 км². Хорошее соответствие.

Такие очень осреднённые данные помогают определить общие параметры рельефа как для изучения его свойств, так и для того, чтобы понимать, от каких значений отталкиваться в локальных измерениях. Пример такого использования мы увидим далее.

Локальные свойства М-сетей

М-сети — это важный и в чём-то уникальный источник сведений о локальных свойствах рельефа. Рассмотрим это на примере участка «Амур». Изображение ЦМР этого участка приведено на *рис. 1а* (см. с. 137) (тёмные области — понижения, особенно в районе Амура и Чукчагирских озёр). Статистические характеристики М-сетей в скользящем круглом окне получены с помощью программного комплекса WinLESSA (*англ.* Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis; Win — для операционной системы Windows) (Златопольский, 2020), в котором можно рассчитать плотности М-долин всех или одного направления, локальные розы-диаграммы, среднее направление вытянутости роз-диаграмм (в диапазоне 180°) и многие другие характеристики. Локальные векторы среднего направления вытянутости объединяются в линии вытянутости, которые наглядно отражают распределение преимущественных направлений по территории (*рис. 2*, см. с. 137).

М-сеть строилась в базовом режиме и передавалась в WinLESSA в виде раstra, с которым работает это программное обеспечение. Для того чтобы измерять характеристики многочисленных М-долин высоких порядков (4-го и 5-го), диаметр окна должен быть большим — 90 км (выбор этого размера поясняется ниже). На *рис. 1б* показана плотность М-долин всех порядков (1–9) с контрастной псевдораскраской: от тёмно-синей (минимум) до жёлтой (максимум).

Подобные характеристики для объединения М-долин от порядка P до наивысшего можно получить при прямом анализе ЦМР (в частности, в WinLESSA), т. е. нет необходимости предварительно искать М-долины. А вот анализ долин одного порядка — это новая и важная

возможность в анализе ЦМР, так как позволяет получить характеристики элементов рельефа определённого уровня иерархии и определённого размера (их ширина в довольно узком диапазоне значений). На *рис. 1в* показана плотность М-долин 2-го порядка. Так как суммарная длина М-долин первых порядков гораздо больше, чем у всех остальных, «рисунок» их плотности определяет «рисунок» общей плотности (см. *рис. 1б*), при том что «рисунок» плотности М-долин других порядков может быть иным, как, например, у плотности М-долин 4-го порядка (*рис. 1г*).

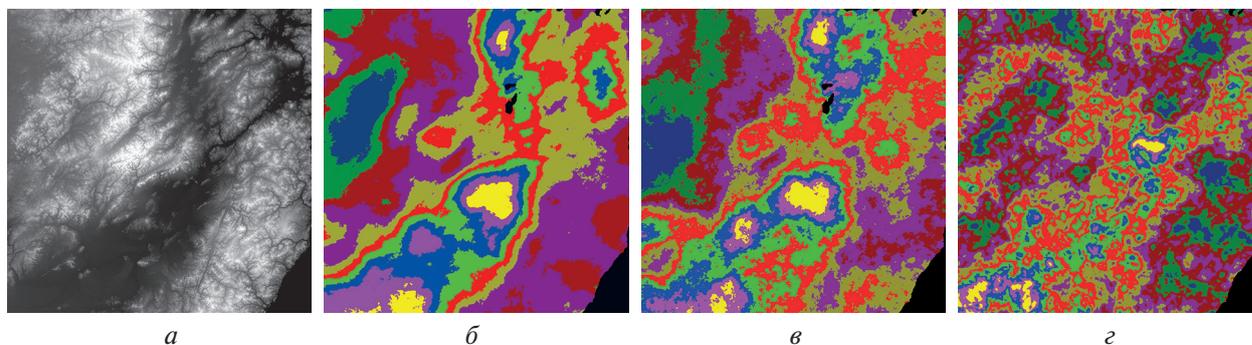


Рис. 1. Локальная статистика для района «Амур»: *а* — изображение ЦМР; *б* — плотность М-долин всех порядков; *в* — плотность М-долин 2-го порядка; *г* — плотность М-долин 4-го порядка

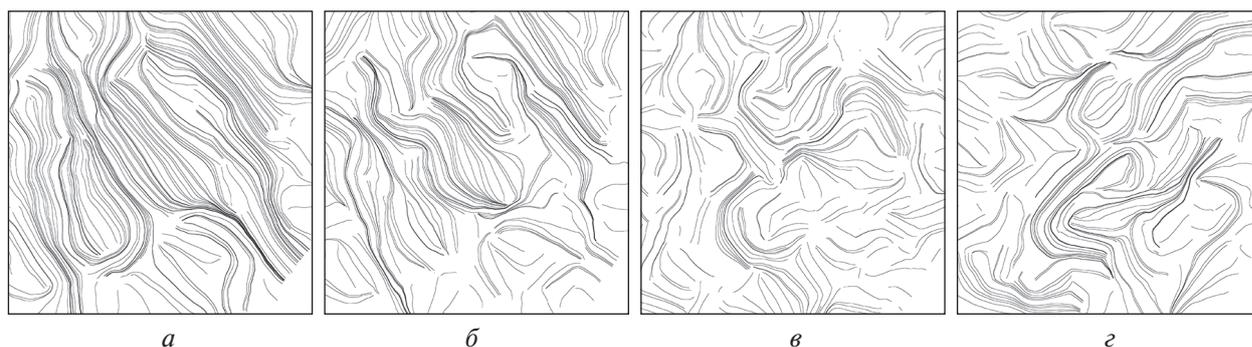


Рис. 2. Линии вытянутости (локальная средняя ориентировка) долин одного порядка для района «Амур»: *а* — второго; *б* — третьего; *в* — четвёртого; *г* — пятого

Обратим внимание, что, хотя среднее значение плотности для отдельных порядков для больших территорий очень близко, локальное среднее существенно варьируется вокруг этих общих средних значений. Например, по приведённой ранее формуле (1) ожидается средняя плотность М-долин 2-го порядка в $0,2 \text{ км/км}^2$, а диапазон значений локальной плотности, показанной на *рис. 1в* (от 10 до 90 % значений), составляет $0,1521\text{--}0,2519 \text{ км/км}^2$. Так что значения плотности лежат вокруг общего среднего, но разброс — 49,4 % от среднего. Для М-долин 4-го порядка средняя плотность по формуле составляет $0,05 \text{ км/км}^2$, а диапазон значений локальной плотности, приведённой на *рис. 1г*, — $0,0261\text{--}0,0722 \text{ км/км}^2$, т. е. разброс — 90,4 % от среднего.

Вторая важная особенность «порядковых статистик» состоит в том, что эти результаты сопрягаются с известными методами анализа базисных поверхностей, с помощью которых возможно установить связь времени заложения М-долин соответствующего порядка с определёнными тектоническими событиями. Рассмотрим пример такого сопоставления. На *рис. 2* приведены «линии вытянутости», которые показывают локальную среднюю ориентировку М-долин одного порядка. По этим линиям хорошо видно, что средняя ориентировка М-долин младших порядков (см. *рис. 2а, б*) в основном северо-западная, на 4-м порядке (см. *рис. 2в*) местами появляется северо-восточное направление, которое у М-долин 5-го порядка (см. *рис. 2г*) становится преимущественным.

В исследовании (Симонов и др., 2021) анализ базисных поверхностей 4-го и 5-го порядков (при базовом способе расчёта) позволил предположить, что во время заложения долин этих порядков произошла смена структурного плана региона, которая «предположительно была синхронна с проявлением миоцен-плиоценового базальтового вулканизма». А значит, можно предположить, что резкое изменение ориентировки между долинами 4-го и 5-го порядков связано с этой сменой структурного плана. Таким образом, анализ М-долин отдельных порядков не только помог уточнить, на долинах какого уровня (масштаба, порядка) происходит резкая смена направления, но и позволил связать эту смену направления с определённым этапом (временем) развития рельефа.

В заключение как пример использования полученных общих статистических соотношений рассмотрим выбор размера окна локального статистического анализа. Окно должно быть не слишком большим, чтобы не пропустить интересующие нас детали. Однако есть и ограничение на этот размер снизу: в окно должно попасть достаточно элементов анализа, чтобы результат получился устойчивым, достоверным. Многолетний опыт работы с программой WinLESSA показал, что суммарная длина М-долин в окне должна быть не меньше $640R$ км (R — разрешение растра, в котором представлена М-сеть). Для М-долин базового порядка P ожидается плотность $0,4/2^{(P-1)}$ км/км², поэтому нужную суммарную длину М-долин ожидаем получить в окне площадью не меньше $1600R \times 2^{(P-1)}$ км², а значит, диаметр окна должен быть не меньше $45,13\sqrt{R \times 2^{(P-1)}}$ км. При разрешении $R = 0,065$ км/пиксель и для порядка $P = 3$ диаметр должен быть не меньше 23 км, а для $P = 5$ — больше 46 км. Однако М-долины высоких порядков длинные и расположены редко. Таким образом, несмотря на то, что для всей территории в среднем плотность М-долин 5-го порядка соответствует ожидаемой, местами М-долин этого порядка просто нет, поэтому окно должно быть существенно больше. В результате для анализа М-долин до 5-го порядка включительно использовано окно 90 км.

Статистическое соответствие порядков в М-сетях с разными параметрами моделирования. Приведённый порядок

В данном разделе рассмотрим, как сопоставлять, агрегировать статистические характеристики М-сетей с небазовыми параметрами и как использовать для таких М-сетей найденные статистические закономерности (1). Опираясь при этом будем на экспериментально обнаруженное для М-сетей с разными параметрами моделирования соответствие порядков — М-долины этих порядков статистически сходны.

Эксперименты с использованием других ЦМР или других алгоритмов моделирования мы не проводили, так что доступно было изменить только порог на минимальную площадь водосбора S , км². Сделать это можно за счёт изменения двух параметров: разрешения ЦМР, R , и/или порога на эту площадь в пикселях, T , $S = TR^2$. При повышении T исключается часть малых водотоков, а у оставшихся меняется порядок. Если же увеличивать R , то кроме этих изменений ещё и несколько меняются, генерализируются, сами линии водотоков.

Рассмотрим соответствие порядков для разных вариантов расчёта М-сетей, при котором и общие, и локальные статистические характеристики М-долин этих порядков близки, хотя для каких-то М-долин не находится соответствия, какие-то М-долины могут иначе делиться на порядки, какие-то — иметь иную генерализацию и т. п. В поиске соответствия ориентировались на то, что соотношение средней площади водосбора долин последовательных порядков исследователи гидросетей оценивают величиной, близкой к четырём. Поэтому мы ожидали, что уменьшение порога на площадь в четыре раза приводит к тому, что в М-сети прибавляется новый наименьший порядок, а при увеличении порога в 4 раза пропадают М-долины наименьшего порядка. Эксперименты это подтвердили.

Формально это можно записать следующим образом. Пусть имеются М-долины порядка K_1 , полученные при разрешении R_1 и пороге T_1 , $S_1 = T_1 R_1^2$. Этим М-долинам в другой М-сети, построенной при разрешении R_2 и пороге T_2 , $S_2 = T_2 R_2^2$, статистически будут соответствовать М-долины порядка K_2 , где:

$$K_2 = K_1 - \log_4(S_1/S_2) \text{ или } K_2 = K_1 - \log_2(R_1/R_2) - \log_4(T_1/T_2). \quad (2)$$

А значит, М-долины порядка K , полученные при разрешении R м/пиксель и пороге T пикселей, будут статистически соответствовать М-долинам базового варианта расчёта с «приведённым порядком» P , где:

$$P = K - \log_4(0,85/S) \text{ или } P = K - \log_2(65/R) - \log_4(200/T). \quad (3)$$

Статистически эти М-долины порядка K ведут себя так же, как рассчитанные с базовыми параметрами М-долины порядка P .

Переход к приведённому порядку позволяет использовать предложенные выше статистические оценки (1) и для М-сетей, рассчитанных с небазовыми параметрами. Так, чтобы оценить, какой может быть суммарная длина М-долин небазового порядка K , достаточно найти для K приведённый порядок P и использовать оценку $0,4/2^{(P-1)}$ км.

Другая возможность. По статистическим характеристикам М-долин одного порядка, рассчитанным с неизвестными нам параметрами, можно приблизительно определить приведённый номер этого порядка. Например, если плотность М-долин одного порядка составляет $0,05 \text{ км/км}^2$, то это долины примерно 4-го базового порядка, а если средняя ширина М-долин одного порядка — $0,5 \text{ км}$, то, видимо, это М-долины базового порядка 0.

Эксперименты показали, что формулы (1) «работают» для приведённого порядка и в том случае, когда порядок получился не целым. Для территории «Амур» рассчитали М-сеть, изменив разрешение ЦМР в $\sqrt{2}$ раз, $0,092 \text{ км/пиксель}$, и получили М-долины с приведёнными порядками 1,5; 2,5 и т. д. Плотность первых трёх порядков почти точно совпадает с формулой $0,4/2^{(P-1)}$, отличие меньше 2%. Для остальных пяти порядков с малочисленными М-долинами отличие доходит до 12,5%.

В качестве примера на фрагменте участка «Кама» рассмотрим, как практически выглядит приведённый порядок для М-долин, рассчитанных с порогом $T = 50$, $S = 0,21 \text{ км}^2$, которые будем называть «новыми», чтобы отличать от базовых, рассчитанных с параметрами $T = 200$, $S = 0,85 \text{ км}^2$. Технически сложно было рассчитать с низким порогом М-сеть всего участка, поэтому её строили на трети территории. По сравнению с базовым вариантом добавились более мелкие долины и значение максимального порядка увеличилось на единицу. По предложенной формуле приведения (3) $P = K - 1$, а значит, новые М-долины порядка X сопоставляем с базовыми М-долинами порядка $X - 1$. При этом визуально часть М-долин соответствующего базового порядка совпадает с новыми, часть отсутствует (у них другой порядок), а часть совпадает с отдельными участками (так как иное деление на порядки). Чем выше порядок, тем меньше видимых различий в М-долинах. А вот различий в статистических показателях почти нет на всех порядках. Например, плотность новых М-долин вполне соответствует формуле $0,4/2^{(P-1)}$: первые три порядка имеют приведённые номера 0, 1 и 2, а плотность их долин оказалась $0,961$; $0,393$ и $0,187 \text{ км/км}^2$. Но главное — нет различий и в локальной статистике. Линии вытянутости для соответствующих вариантов М-долин — скажем, рисунок линий по новым М-долинами порядка 3 и рисунок линий по базовым М-долинами порядка 2 — различаются настолько мало, что нет смысла приводить здесь их изображения.

Заметим, что для того, чтобы воспользоваться предложенной выше формулой расчёта диаметра окна для локального анализа М-долин порядка K , рассчитанных не в базовом варианте, достаточно пересчитать порядок K в приведённый порядок P .

Выводы

- Для получения сопоставимых статистических данных об М-сетях предлагается ориентироваться на конкретный базовый параметр в общепринятом ГИС-алгоритме построения этих сетей: порог на площадь водосбора — $0,85 \text{ км}^2$. Чтобы сопоставлять результаты статистического анализа М-сетей, рассчитанных с небазовыми параметрами, предложен способ пересчёта порядка этих М-сетей в соответствующий «приведённый» порядок базового варианта со статистически близкими М-долинами.

- По единой ЦМР (SRTM) с использованием базовых параметров (разрешение 65 м/пиксель и порог 200 пикселей) построены М-сети для четырёх совершенно различных территорий (около 400 000 км² каждая). Для М-долин первых порядков, которые достаточно многочисленны, получены следующие результаты:
 - значения средней плотности М-долин одного порядка на всех территориях очень близки (разброс значений 10 %);
 - отношение средней плотности М-долин последовательных порядков во всех случаях — около двух;
 - для М-долин первых базовых порядков, P , можно ожидать среднюю плотность $0,4/2^{(P-1)}$ км/км²;
 - с учётом результатов указанных предшествующих исследований аналогичные соотношения предложены для среднего числа М-долин на квадратный километр — $0,27/4,4^{(P-1)}$, средней длины М-долин — $1,48 \cdot 2,2^{(P-1)}$ км и средней ширины — $2^{(P-1)}$ км.

Эти формулы соответствуют отношениям Хортона для реальных гидросетей. Возможно, близость абсолютных значений этих характеристик у столь разных территорий отражает глубинные свойства организации рельефа.

Предложенные формулы можно использовать и при небазовых параметрах расчёта М-сети, достаточно пересчитать порядок М-долин в приведённый порядок базового варианта.

Дан пример методического использования найденной формулы плотности М-долин при расчёте локальной статистики.

- Локальный статистический анализ М-долин отдельных порядков позволяет определить характеристики элементов рельефа соответствующего размера.

Приведён пример того, как статистические свойства рельефа могут быть связаны с М-долинами определённого базового порядка, а через использование соответствующих базисных поверхностей — с геологическими событиями определённого этапа развития рельефа.

Дальнейшие исследования должны начинаться с проверки полученных соотношений на территориях совершенно иного типа, таких как Тибет, Амазонка и др. Важно проверить, уточнить параметры предложенных формул, а далее постараться понять, как найденные закономерности связаны с процессами образования рельефа.

Автор благодарит Б. И. Гарцмана за глубокое обсуждение результатов и за сделанные замечания, существенно улучшившие их изложение.

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. 273–285.
2. Златопольский А. А. Эффективное пространственное разрешение данных и инструмента. На примере мультимасштабного анализа ЦМР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 18–25.
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. 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.

5. 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.
6. 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.
7. Нугманов И. И., Нугманова Е. В., Чернова И. Ю. Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур. Казань: Казанский ун-т, 2016. 53 с.
8. Симонов Д. А., Захаров В. С., Гильманова Г. З., Диденко А. Н. Новейшая тектоника Северного Сихотэ-Алиня и сопредельных территорий и её 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>.
9. Хортон Р. Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Гидрофизический подход к количественной морфологии / пер. с англ. М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1948. 158 с.
10. Pelletier J. D. Self-organization and scaling relationships of evolving river networks // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. No. B4. P. 7359–7375.

Ordinal statistics of the valleys found by the digital terrain model: Basic calculation and converted order

A. A. Zlatopolsky

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mai: aazlat@gmail.com

According to the digital terrain model (DTM), networks of watercourses (we call them M-valleys) for four large territories: “Amur”, “Shilka”, “Kama”, “Niger” (approx. 400 000 km² each) were built using a standard algorithm. In all cases, the same basic calculation parameters with a minimum catchment area of 0,85 km² were used. It was found that the values of the average density of M-valleys of the same order in all territories are very close (the spread of values is 10 %), and the ratio of the average density of M-valleys of successive orders in all cases is about 2. Based on these measurements, we assume that for large areas and M-valleys of the first basic orders, P , an average density of $0,4/2^{(P-1)}$ km/km² can be expected. Similar, though less reliable estimates were obtained for the average number of M-valleys per km² $0,27/4,4^{(P-1)}$, the average length of M-valleys $1,48 \cdot 2,2^{(P-1)}$ km and the average width of M-valleys $2^{(P-1)}$ km. These formulas correspond to the Horton relations for hydraulic networks. Perhaps the proximity of the absolute M-values of these characteristics for such different territories reflects the deep properties of the relief organization. It is proposed how, with non-basic calculation parameters, to recalculate the order of the M-valleys into the “converted” order of the basic variant, in which the M-valleys have similar statistical characteristics. We provide an example of the methodical use of the M-valleys density relationships stated above to calculate local statistics. It is shown, that the local statistical analysis of M-valleys of definite orders makes it possible to identify the characteristics of relief elements of appropriate sizes. We also provide an example of how the detected statistical properties of the relief can be associated with M-valleys of a certain basic order, and through the use of basic surfaces, these properties can be associated with geological events of a certain time.

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

Accepted: 04.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-133-142

References

1. Gartsman B. I., Bugaets A. N., Tegai N. D., Krasnopeev S. M., Analysis of the structure of river systems and prospects for modeling hydrological processes, In: *River system of Pacific Russia: A quarter century of research*, Vladivostok: Dalnauka, 2015, pp. 273–285 (in Russian).
2. Zlatopolsky A. A., Effective data and instrument spatial resolution. By the example of the multiscale DTM analysis, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 18–25 (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. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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).
8. 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).
9. 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.
10. Pelletier J. D., Self-organization and scaling relationships of evolving river networks, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. B4, pp. 7359–7375.