

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 551.4:571.6

DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.110

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЧНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА: ПРОБЛЕМА «КОРОТКИХ» ПРИТОКОВ

В.Ф. Толкачева¹, Б.И. Гарцман¹,
А.Л. Энтин^{2,1}

¹ *Институт водных проблем РАН, г. Москва,
Россия;* ² *Московский государственный
университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва,
Россия*

e-mail: vasilisa.tolkachevag@yandex.ru

MODELING OF RIVER NETWORK BASED ON DIGITAL ELEVATION MODEL: THE PROBLEM OF 'SHORT' TRIBUTARIES

Vasilisa F. Tolkacheva¹, Boris I. Gartsman¹,
Andrey L. Entin^{2,1}

¹ *Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia;*
² *Lomonosov Moscow State University, Moscow,
Russia*

e-mail: vasilisa.tolkachevag@yandex.ru

Аннотация. Развитие гидрологического моделирования в условиях нестационарного климата и динамичности ландшафтного строения речных бассейнов при дефиците данных наблюдений, требует привлечение нового массива данных – данных анализа рельефа бассейнов и структуры речных систем. Появление глобальных цифровых моделей рельефа высокого разрешения создало принципиально новые возможности и требует разработки программного инструментария целевой обработки таких моделей. Принимая во внимание, что в последнее десятилетие структурно-гидрографический анализ речных систем столкнулся с размыванием и, в перспективе, утратой прежнего образа объекта исследований, и с потерей взаимной связи между структурой речной системы и рельефом её бассейна, если они получены из различных источников данных, исследования в этом направлении становятся ключевым для развития всего научного направления. В статье рассматриваются некоторые аспекты получения адекватных моделей речной сети на основе цифровых моделей рельефа. Целью и основой исследования является развитие методов и технологии моделирования речной сети на основе

Abstract. The developing of hydrological modeling under the conditions of a non-stationary climate, changing landscape of river basins, and a lack of observational data, asks the use of new data, such as terrain analysis data and data on the structure of river systems. The advent of high-resolution digital elevation models has opened up new opportunities in modeling. However, such modeling with modern data requires the development of new software and tools. In the past decade, structural-hydrographic analysis of river systems, as a scientific field, has faced as the blurring and, potentially, the loss of its research subject, as the loss of the main interrelationship "the river system - the topography of the basin of this system", if the data are obtained from different sources. Research with this subject is becoming key to the preservation and development of the entire scientific field. This article discusses some aspects of obtaining adequate models of the river network based on digital elevation models. The aim and basis of the research is the development of methods and technology for modeling the river network based on digital elevation models using various spatial data.

In a territory with a "young" topography and a non-equilibrium nature of river systems (the Black Sea coast of the Caucasus), using customized tools-

цифровых моделей рельефа с использованием пространственных данных, представляющих климатические характеристики.

На территории Черноморского побережья Кавказа, характеризующегося геологической «молодостью» рельефа и явно неравновесным характером речных систем на этапе активного врезания, с помощью авторских инструментов-надстроек для среды ArcGIS Desktop проведено моделирование речной сети в трех бассейнах, с различными общими высотными характеристиками рельефа, по 7 вариантам функции инициации. Выявлена и проработана методически новая концептуальная проблема, искажающая процесс калибровки моделей речной сети и препятствующая получению адекватных результатов моделирования. Авторами предложена оригинальная модель автоматического построения речной сети с двумя калибруемыми параметрами. Получены предварительные данные о разнородности характера формирования речной сети в разнообразных ландшафтных условиях, выраженных в различной значимости фактора уклона, а также в ландшафтно-обусловленных пространственных различиях пороговых значений функций инициации.

Ключевые слова: структурно-гидрографический анализ; речные сети; инструменты автоматизированной оцифровки; цифровая модель рельефа; функции инициации; моделирование.

Введение

В настоящее время ясно обозначился этап в создании нового теоретического фундамента для исследований речных систем, проводимого на стыке гидрологии суши и геоморфологии. Перспективные возможности в этом смысле предоставляет структурно-гидрографический анализ речных систем [Гарцман и др., 2008; Гарцман, Галанин, 2011; Гарцман, 2013]. Работы [Rodriguez-Iturbe, Rinaldo, 1997; Yen, Lee, 1997; Reggiani et al., 2001; Gupta, 2004; Lee, Chang, 2005] представляют ряд статистических и детерминированных гидрологических моделей нового поколения с использованием данных о

add-ons for the ArcGIS Desktop environment, river network modeling was carried out in three basins according to 7 variants of the initiation function. A new conceptual problem was identified and methodically elaborated, which distorts the process of calibrating river network models and hinders the obtaining of adequate modeling results. The authors proposed an original model for the automatic construction of a river network with two calibrated parameters. Preliminary data were obtained on the heterogeneity of the nature of the formation of the river network in various landscape conditions, expressed in the different significance of the slope factor, as well as in landscape-conditioned spatial differences in the threshold values of the initiation functions.

Keywords: structural-hydrographic analysis; river networks; automated digitization tools; digital elevation model; initiation functions; modeling.

структуре речных систем и морфологии их бассейнов. Число работ по этой тематике в России пока невелико. В последней четверти XX в. следует упомянуть труды дальневосточной и сибирской школ гидрологии [Гарцман, 1973; Казанский, 1977; Карасев, Худяков, 1984; Кoryтный, 2001], а позднее – сотрудников географического факультета МГУ [Алексеевский, 2010; Сидорчук, 2014]. Интересной является также монография [Еременко, Панин, 2010], где динамика низкопорядковой речной сети рассматривается в палеогеографическом аспекте.

Развитие технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) привело к появлению

общедоступных цифровых моделей рельефа (ЦМР) в виде глобальных покрытий с разрешением, эквивалентным картам среднего масштаба (1:100000 – 1:200000), что создает принципиально новые возможности в науках о Земле, для которых анализ рельефа представляет ключевую важность. Одновременно происходил менее заметный процесс смены технологий картографирования, в результате чего принципиально изменился характер изображения речной сети на карте в сторону снижения требований к методической строгости и точности. Имеется также один неочевидный аспект, хорошо знакомый специалистам: при работе с речной сетью на топографической карте рельеф бассейнов представлен на той же карте, изображенный в том же масштабе и в органичной связи с речной сетью. Если же эту речную сеть в виде оцифрованного векторного слоя наложить на ЦМР, даже максимально точно и корректно, видны многочисленные нарушения взаимосвязи водотоков с рельефом. Речная сеть с топографической карты оказывается плохо «вложенной» в рельеф, представленный в виде ЦМР, и при попытках их совместной автоматизированной обработки неизбежно возникают многочисленные ошибки.

Таким образом, развитие структурно-гидрографического анализа речных систем как научного направления сталкивается, в результате распространения ДЗЗ, во-первых, с размыванием и, в перспективе, утратой прежнего образа объекта исследований, а во-вторых – с потерей взаимной связи между структурой речной системы и рельефом её бассейна, если они получены из различных источников данных. Решением проблемы представляется моделирование (автоматическая оцифровка) речной сети на основе ЦМР с использованием других видов пространственных данных. Получаемые таким образом модели речной сети всегда аккуратно «вложены» в рельеф, однако в какой мере они сохраняют свойства и закономерности, присущие природным речным сетям?

Ответ на этот вопрос, становящийся ключевым для развития всего научного направления, является сложным и нетривиальным. Некоторым аспектам получения

адекватных моделей речной сети с ЦМР посвящена данная статья. Основой исследования и его конечной целью является развитие современных методов и технологий анализа рельефа бассейнов и структуры речных систем на основе ЦМР, реализованные в виде пользовательского инструментария в среде ArcMap. Разработанные к настоящему времени инструменты [Gartsman, Entin, Shekman, 2024] реализованы как скрипты на языке Python с использованием возможностей ArcGIS Desktop 10.8. При их разработке, если явно не указано иное, используются инструменты группы Spatial Analyst. Обратная совместимость проверена для версий ArcGIS Desktop 10.5, 10.7. Текущая версия набора инструментов расположена в свободном доступе с открытым кодом по адресу <https://github.com/aentin/ArcPyStreamScape>.

Методы и материалы

Инструмент Stream Network Orders из набора ArcPyStreamScape реализует единый алгоритм определения истоков водотоков и построения речной сети по ЦМР на основе подбора порогового значения функции инициации, с возможностью выбора из нескольких форм этой функции [Rodriguez-Iturbe, Rinaldo, 1997; Гарцман, Шекман, 2016] – индексов, вычисляемых для каждого пиксела в пределах бассейна. Шесть вариантов индексов основаны на общей форме функции инициации, параметризующей интенсивность эрозионного действия потока на подстилающую поверхность в виде выражения [Rodriguez-Iturbe, Rinaldo, 1997]

$$a = \beta Q^m \Delta z^n, \quad (1)$$

где Q – расход воды, Δz – крутизна склона, β , m , n – параметры, подбираемые путем калибровки. Зачастую в данной формуле используется площадь водосбора A , которая замещает (*surrogate*) расход Q при условии равномерного орошения водосбора осадками. Для более точного представления расхода в форме функции инициации авторами [Гарцман, Шекман, 2016] предложено использовать информацию о годовых слоях осадков P и эвапотранспирации ET .

Используются следующие индексы [Gartsman, Entin, Shekman, 2024], вычисляемые для каждого i -го пиксела ЦМР, причем P_i в

выражениях ниже означает средний по водосбору i -го пиксела годовой слой осадков, а ET – аналогичный слой эвапотранспирации:

- $E_i^* \propto A_i$ – водосборная площадь;
- $E_i^* \propto A_i (P_i - ET_i)$ – объем климатического стока Q_c ;
- $E_i^* \propto A_i^{0.5} \Delta z_i$ – индекс напряжения сдвига (по A);
- $E_i^* \propto (A_i (P_i - ET_i))^{0.5} \Delta z_i$ – индекс напряжения сдвига (по Q_c);
- $E_i^* \propto A_i \Delta z_i$ – индекс энергии рельефа (по A);
- $E_i^* \propto A_i (P_i - ET_i) \Delta z_i$ – индекс энергии рельефа (по Q_c).

Кроме перечисленных вариантов общей формулы (1), применяются еще два варианта функции инициации, представляющие собой индексы не интенсивности, а результата эрозионного воздействия: среднее падение ΔH_{ci} и порядок сегмента полной дренажной сети ω^* . Среднее падение бассейна ΔH_{ci} равно разности средней высоты водосбора каждой точки и ее собственной высоты. Под полной дренажной

сетью понимается сеть линий тока, включающая все ячейки ЦМР; порядок ее сегмента ω^* также может использоваться как критерий для реконструкции сети тальвегов.

Разнообразие встроенных в инструмент Stream Network Orders функций инициации позволяет выполнять сравнительный анализ полученных на их основе моделей речной сети. Исходными наборами данных для расчета являются ЦМР, а также растровые наборы данных о среднегодовых слоях осадков и эвапотранспирации. Для выбранной функции инициации должно быть установлено пороговое значение. Примеры моделирования сети водотоков с использованием разных пороговых значений функции инициации представлены на рисунке 1. На их основе вычисляются суммарная длина сегментов водотоков, а также их общее число – сначала для всей сети в целом, затем для каждого порядка в отдельности. Полученные статистики сохраняются в текстовый файл.

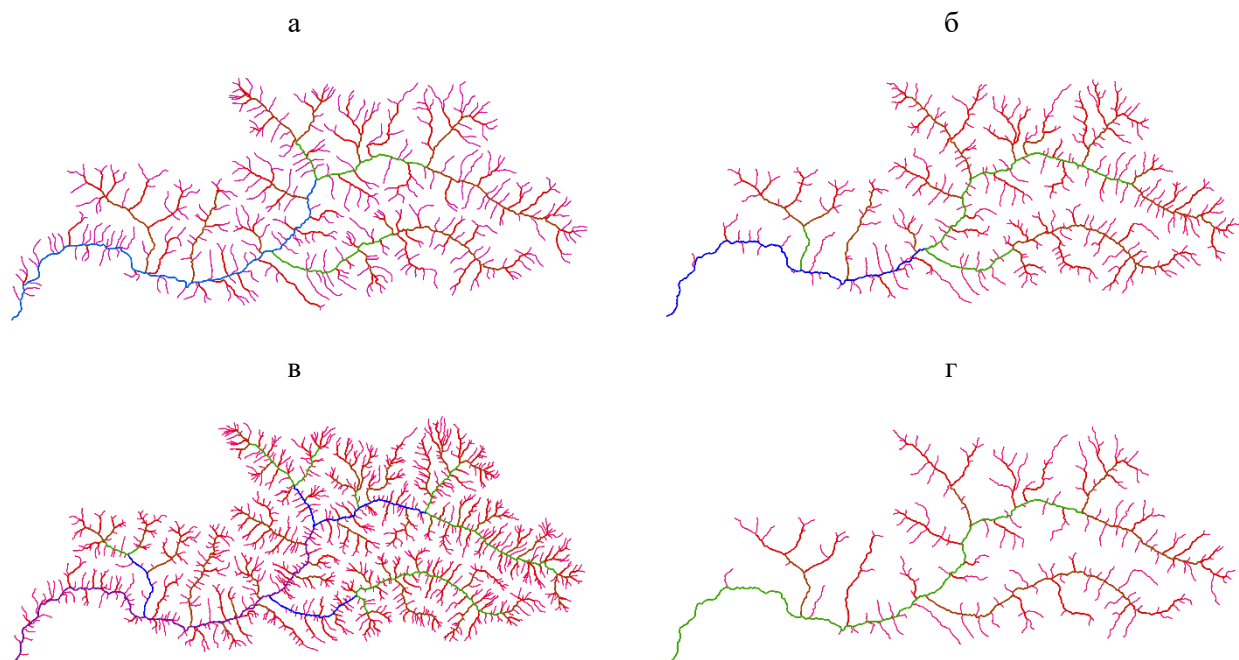


Рисунок 1. Фактическая и модельные речные сети, рассчитанные инструментом Stream Network Orders по индексу CEI: а) фактическая, старший порядок $N=5$; б) оптимальная модель, пороговое значение CEI 221500, $N=5$; в) модель при пороговом CEI 150000, $N=6$; г) модель при пороговом CEI 500000, $N=4$. Порядки водотоков: 1 – малиновый; 2 – красный; 3 – коричневый; 4 – зеленый; 5 – синий; 6 – лиловый

Figure 1. Actual river network and model ones calculated using the Stream Network Orders tool based on the CEI index: а) actual, highest order $N=5$; б) optimal model, CEI threshold 221500, $N=5$; в) model with CEI threshold 150000, $N=6$; г) model with CEI threshold 500000, $N=4$. Stream orders: 1 – crimson; 2 – red; 3 – brown; 4 – green; 5 – blue; 6 – purple

При испытании инструмента Stream Network Orders на реках Черноморского побережья Кавказа выявлена специфическая методическая проблема, обозначенная как проблема «коротких» водотоков. Рассмотрим её на примере бассейнов трех рек – Адерба, Псезуапсе, Шахе. Черноморское побережье Кавказа – регион, относящийся к альпийскому складчатому поясу, характеризуется геологической «молодостью» рельефа и явно неравновесным характером речных систем на этапе врезания при интенсивных восходящих тектонических движениях. Три исследуемых бассейна характеризуются различными общими высотными характеристиками рельефа и интенсивностью тектонического воздымания и в разной степени включают высотные пояса, выделяемые на исследуемой территории [Клименко, Куканов, Прокофьев, 1979] (рисунок 2). Реки Псезуапсе и Шахе протекают в Лазаревском районе города Сочи, Краснодарского края. Площадь бассейна

Псезуапсе – 290 км², рельеф – горный с наибольшими высотами (800–1000 м) в верховьях реки, на преобладающем протяжении долина реки V-образная. Площадь водосборного бассейна Шахе – 553 км². Рельеф бассейна горный, изрезанный долинами многочисленных притоков и оврагами, характеризующийся большими относительными высотами, достигающими 1400–1800 м в верховьях и в среднем течении, и до 200 м в нижнем течении. Долина в верховьях V-образная, а ниже до устья ящикообразная. Река Адерба – река в Краснодарском крае, берёт начало на территории Крымского района, далее течёт по территории города Геленджик, имеет широкую пойму. Площадь бассейна – 73,5 км², максимальные высоты достигают 600–750 м. Преобладающим элементом режима всех перечисленных рек являются дождевые паводки в течение всего года, для Псезуапсе и Шахе существенна также доля снегового питания [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1964].



Рисунок 2. Цифровая модель рельефа FABDEM российского сегмента черноморского побережья Кавказа с бассейнами моделируемых речных сетей: 1 – Адебра, 2 – Псезуапсе, 3 – Шахе
Figure 2. The FABDEM digital elevation model of the Russian segment of the Black Sea coast of the Caucasus with the basins of the modeled river networks: 1 – Aderba, 2 – Psezuapse, 3 – Shahe

Моделирование речных сетей выполнялась в среде ArcGIS10.8.2 инструментом Stream Network Order. Использовалась ЦМР из открытых источников – FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) [Laurence Hawker et al., 2022], перепроецированная в систему координат равновеликой конической проекции [Albers, 1805] с квадратным пикселем размера

22,5×22,5 м. В качестве фактической речной сети использовались оцифрованные «голубые линии» карты масштаба 1:100 000, привязанные в единой системе координат с ЦМР. Калибровка производилась методом ручного подбора оптимальных пороговых значений различных индексов, при которых модельная сеть максимально совпадает с фактической. Главным

критерием калибровки служило совпадение суммарные длины модельных и фактической количества притоков 1-го порядка в речной сети. Результаты калибровок приведены в сравнимых речных сетях, а дополнительным – таблице 1.

Таблица 1. Сопоставление вариантов речной сети, смоделированной по различным индексам, с картографическим изображением

Table 1. Comparison of river network variants, modeled using different indices, with a cartographic image

Бассейн	Псеузапсе		Шахе		Адерба	
	Кол-во водотоков 1-го порядка, шт.	Общая длина водотоков, км	Кол-во водотоков 1-го порядка, шт.	Общая длина водотоков, км	Кол-во водотоков 1-го порядка, шт.	Общая длина водотоков, км
Топокарта	131	268,5	351	668,8	62	180,0
A	131	238,1	351	527,2	63	161,2
zA	131	214,9	351	493,5	62	158,3
zA ^{0,5}	132	201,4	352	448,9	62	151,7
Q	131	232,5	351	526,9	62	163,1
CEI	130	208,0	351	476,8	62	153,8
zQ ^{0,5}	130	198,8	351	447,7	62	158,9
H _c	132	168,0	351	382,5	62	109,6

Как неоднократно отмечалась ранее [Гарцман, 2013; Гарцман, Шекман, 2016], оцифрованная по ЦМР речная сеть обычно получается существенно короче фактической. Известной причиной этого является неучет в моделях двух эффектов – естественной извилистости русловой сети, не отображаемой в масштабе ЦМР, и явления попятной эрозии, приводящей к постепенному удлинению первичных водотоков в процессе их развития. В связи с этим, занижение суммарной длины модельной сети по сравнению с фактической в пределах 10–15 % считалось приемлемым результатом, и такого результата обычно удавалось достичь.

Данные таблицы 1 показывают, однако, что занижение суммарной длины модельной речной сети систематически выходит за упомянутый предел допустимого. Было установлено, что наиболее резко различаются у модельных и фактических сетей именно суммарные длины водотоков 1-го порядка, обеспечивая большую, а иногда и избыточную, часть расхождения. Рассмотрим гистограммы распределения длин притоков 1-го порядка для фактической и одной из модельных сетей для р. Шахе (рисунок 3).

Как видно на рисунке 3а, минимальная длина притоков 1-го порядка фактической речной сети 285 м, а основная масса таких водотоков имеют длину в диапазоне 400–1600 м. В то же

время, для модельной речной сети минимальная длина водотока 1-го порядка (рисунок 3б) составляет менее 34 м, а основная масса водотоков имеет длину до 1000 м.

При детальном визуальном анализе модельной речной сети выявляется значительное число водотоков 1-го порядка, длина которых делает их почти неразличимыми в масштабе всего бассейна (рисунок 4а). Длина водотока 34 м по отношению к используемой ЦМР представляет собой результат векторизации растрового притока размером всего в 1 пиксель. Отметим, что степень недоучета длины речной сети особенно велика для вариантов индексов, учитывающих величину локального уклона и другие характеристики вертикальной расчлененности бассейна (см. таблицу 1). Кроме того, большое количество «коротких» притоков и их влияние на результат моделирования ярко выявились именно при работе в области кайнозойской складчатости, где современные тектонические поднятия большой интенсивности приводят к формированию контрастного «молодого» эрозионного рельефа – в отличие от ранее выполненных исследований в горных странах мезозойского и более древнего возраста [Гарцман, 2013]. Эти два обстоятельства позволили сформулировать гипотезу, на основе которой выполнена корректировка алгоритма моделирования речной сети по ЦМР.

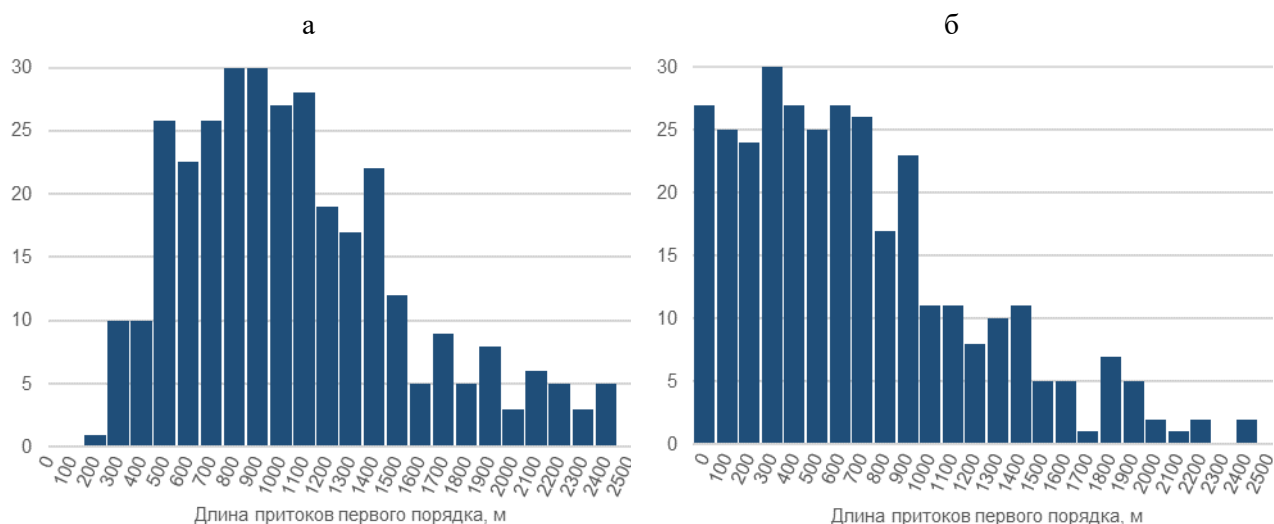


Рисунок 3. Гистограммы распределения длин притоков 1-го порядка речной сети реки Шахе: а) фактической; б) моделированной по A

Figure 3. Histograms of the distribution of the lengths of 1st-order tributaries of the Shahe river network: a) actual; b) modeled according to A

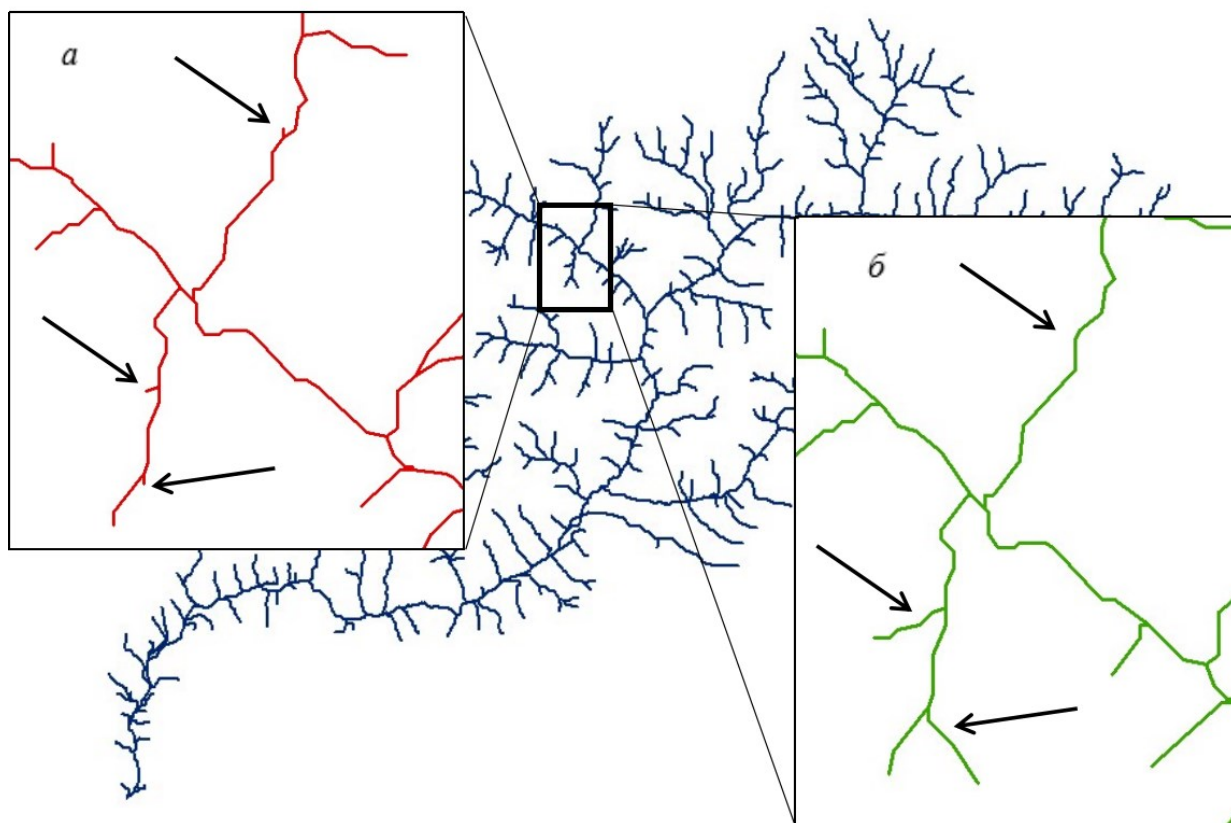


Рисунок 4. Фрагменты речной сети Шахе, смоделированной без применения пороговой длины водотока 1-го порядка (а, красные линии) и аналогичный фрагмент речной сети, смоделированной с применением такого условия (б, зеленые линии)

Figure 4. Fragments of the Shahe river network, modeled without applying a threshold length for 1st-order streams (a, red lines) and a similar fragment of the river network, modeled with the application of this condition (b, green lines)

Очевидно, при автоматизированном не исключены локальные случайные превышения вычисления любого индекса функции инициации его порогового значения, обусловленные как

«грубостью» принятой концепции формирования истока водотока, так и низким разрешением самой ЦМР. Наиболее часто такие превышения связаны с индексами, включающими величину локального уклона, которая как раз содержит значительные погрешности в местах переломов профилей склонов и тальвегов. Понятно, что на высококонтрастном неравновесном эрозионном рельефе такие точки будут наиболее многочисленны. Если трассирование от возникшего таким образом истока приводит к формированию очень короткого водотока, то есть основания им пренебречь как артефактом. Такие артефакты, необоснованно возникающие в случайных точках речной сети, не только приводят к сильному занижению её суммарной длины, но и в целом искажают процедуру калибровки модели и получаемый рисунок сети, поскольку именно число первичных водотоков, без учета их размеров, является основным калибровочным критерием.

Принцип выделения водотока 1-го порядка только на основе позиционирования его истока в результате накопления некоторого индекса эрозионного воздействия (расхода, площади водосбора и др.) представляется недостаточным. Признаками первичного постоянного водотока, очевидно, является наличие необходимого объема стока и достаточно устойчивого его режима, типичных долинных и русловых форм, характерного комплекса аллювиальных отложений. Условия его формирования включают определенные размеры и форму бассейна, необходимые параметры климата, почвенно-растительного покрова, горных пород, особенности взаимодействия русловой сети с подземными водоносными горизонтами. В такой трактовке вопрос о первичном водотоке является специфическим преломлением основной проблематики ландшафтной гидрологии.

Вполне обоснованно можно предположить, что выделяемый водоток 1-го порядка должен характеризоваться не только накоплением интенсивности эрозионного воздействия для инициации его развития, но и некоторым минимальным пространственным масштабом, обеспечивающим и характеризующим его устойчивость как природного объекта. В принятой нами схематизации для выделения

водотока 1-го порядка целесообразно дополнить алгоритм модели вторым калибруемым параметром – минимальной допустимой длиной водотока 1-го порядка.

Результаты и обсуждение

Для решения проблемы «коротких» водотоков алгоритм инструмента Stream Network Order был дополнен опцией задания на входе калибровочной процедуры минимального числа ячеек, составляющих сегмент речной сети 1-го порядка. При выполнении алгоритма калибровки модели речной сети, описанной в [Gartsman, Entin, Shekman, 2024], после каждой итерации выделения растровой речной сети выполняется проверка сегментов 1-го порядка на превышение заданного порога длины. Если длина сегмента меньше пороговой, он выбрасывается из сети вместе с соответствующим ему узлом слияния. В результате рисунок внешнего отдела речной сети существенно трансформируется, в ней сохраняются лишь хорошо обоснованные первичные водотоки, средняя длина которых значительно возрастает.

Калибровка порогового значения длины выполняется ручным подбором – после отработки одного значения можно задать другое перед новым запуском инструмента Stream Network Order, а затем сопоставить результаты. Отметим, что в результате описанного дополнения алгоритма повышается размерность модели, которая переходит в категорию моделей с двумя калибруемыми параметрами. Авторам неизвестны публикации, отражающие исследования, в которых был бы применен подобный подход калибровки двух параметров при моделировании речной сети по ЦМР на основе функции инициации.

Опыт использования параметра минимальной длины первичного водотока показывает, что настоящей процедуры калибровки, в смысле поиска экстремума целевой функции качества моделирования, не получилось. Качество модели по критерию близости суммарной длины модельной сети к фактической монотонно растет по мере увеличения пороговой длины от нуля до минимального фактического значения. При превышении этого минимального значения качество по данному критерию может возрастать и далее, однако при этом возникает

уже противоречие другого плана, которое требует осмысления. В связи с этим, на данном этапе исследования при калибровках моделей использовалось пороговое значение минимальной длины первичного водотока такое же, как у фактической речной сети.

Чем же обусловлена минимальная величина водотока 1-го порядка, выявленная для фактических речных сетей? Является ли она отражением природной закономерности, демонстрируя характерный минимальный масштаб первичного водотока, или является простым техническим следствием принятой методики картографирования водных объектов? К сожалению, однозначного ответа на эти вопросы сейчас дать невозможно. В руководящих документах по созданию и обновлению топографических карт среднего и крупного масштаба содержится достаточно указаний, рекомендуемых отбор водотоков для отображения по искусственным критериям, а в некоторых случаях, особенно для горных территорий, допускающих субъективные решения конкретных исполнителей картографических работ.

Так, в руководящем документе по созданию и обновлению топографических карт ГКИНП-05-029-84¹ в пункте 37 сказано: «Реки и ручьи показываются:

- на картах масштабов 1:10000 – 1:25000 – все, независимо от их протяженности;
- на картах масштабов 1:50000 – 1:200000 – как правило, длиной в масштабе карты 1 см и более;
- на картах масштабов 1:500000 – 1:1000000 – 1,5 см и более.

Реки и ручьи (постоянные и пересыхающие), каналы и канавы в зависимости от ширины водотока и масштаба карты изображаются в одну или две линии».

В руководстве по картографическим и картоиздательским работам [Руководство..., 1978]

говорится: «На картах показываются все реки и ручьи независимо от их протяженности и местности, по которой они протекают, за исключением горных районов, при изображении которых на картах масштабов 1:50 000 и 1:100 000 ручьи длиной в масштабе карты менее 1 см показываются с отбором».

В руководящем документе по созданию учебных физических карт ГКИНП-14-132-80² указывается, что: «Реки показываются длиной не менее 5–6 см в масштабе карты. Реки меньшей длины могут быть нанесены в маловодных и горных районах, а также связанные со специальным содержанием или в тех случаях, когда на них расположены областные или крупные промышленные центры, или по ним проходят границы». Дальнейшие решения о нанесении или не нанесении водотоков на карту зависят от конкретного топографа, работающего с данным участком. На сегодняшний день эти рекомендации уже не актуальны, однако на момент составления топографических карт, с которых снимаются «фактические» речные сети, они были основными руководящими документами по составлению топографических карт и материалов.

Таким образом, речная сеть, называемая нами «фактической», представляет собой также лишь модель, составленную при значительной роли искусственных технических ограничений и индивидуального экспертного опыта. В критическом для нашей задачи аспекте отображения первичной сети водотоков полнота и адекватность этой модели неизвестны, и могут быть поставлены под сомнение. Опыт определения минимальной длины водотока 1-го порядка по картографическим изображениям многих речных бассейнов показал, что она может быть неустойчивой в пространстве – значительно и незакономерно различаться для соседних

¹ Геодезические, картографические инструкции, нормы и правила «Основные положения по созданию и обновлению топографических карт масштабов 1:10000, 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000» ГКИНП-05-029-84 // Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, Военно-топографическое управление Генерального штаба

² Геодезические, картографические инструкции, нормы и правила «Руководящий технический материал по созданию учебных физических карт союзных республик, автономных советских социалистических республик, краев, областей СССР со сведениями по краеведению» ГКИНП-14-132-80 от 29.05.1980 № 236п. // Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР

водосборов. В целом это обстоятельство добавляет сложности поставленной задаче воспроизведения структуры речной сети по цифровой модели рельефа на основе моделей с калибруемыми параметрами. Вопрос требует дальнейшей разработки.

После доработки инструмента Stream Network Order распределение длин водотоков 1-го порядка, полученное в результате моделирования

с учетом минимальной длины первичного водотока, существенно приблизилось к фактическому (см. пример на рисунке 5). В новом модельном построении минимальное значение первичного водотока 146 м, а длины основной части водотоков лежит теперь в интервале 200–1400 м. Форма гистограммы длин при этом несколько приблизилась к фактической, но еще существенно отличается.

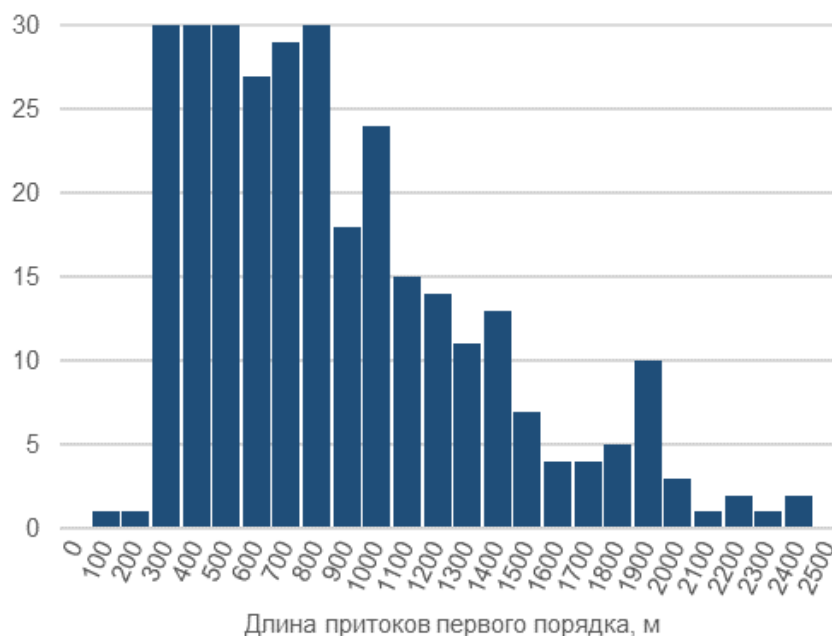


Рисунок 5. Гистограмма распределения длин притоков 1-го порядка речной сети бассейна р. Шахе, смоделированной с применением минимальной длины сегмента 1-го порядка

Figure 5. Histogram of the distribution of the lengths of 1st-order tributaries of the Shahe river basin, modeled with the application of a minimum length for 1st-order segments

Сопоставление фрагмента новой модели речной сети реки Шахе с применением минимальной длины водотоков 1-го порядка (рисунок 4б) с фрагментом прежней модели без такого применения показывает, что некоторые слишком короткие притоки удлиняются, а остальные отбрасываются. После удаления «коротких» водотоков либо принимающие их водотоки более высокого порядка «сшиваются» в месте узла слияния в один, либо, если сливались два водотока 1-го порядка и давали 2-й порядок, при удалении одного водотока 1-го порядка водоток 2-го порядка приобретает 1-й порядок и «сшивается» с оставшимся водотоком 1-го порядка. Встречается еще третий, относительно редкий вариант перестройки сети, когда оба сливающихся водотока 1-го порядка оказываются короче минимального значения и отбрасываются.

В этом случае образуемый ими ранее водоток 2-го порядка приобретает 1-й порядок без удлинения. За счет этого в модельной речной сети иногда могут возникнуть новые водотоки 1-го порядка с длиной меньше минимального значения, как видно на рисунке 5. Для устранения последней проблемы требуется нетривиальная доработка алгоритма, которая является задачей его дальнейшего развития. Влияние этих редких ситуаций на конечный результат незначительно.

После обновления инструмента речные сети, представленные в таблице 1, были смоделированы заново (таблица 2). За счет задания минимальной длины водотока 1-го порядка по всем вариантам функции инициации суммарная длина модельной сети существенно приближается к фактической, причем почти во всех случаях попадает в 15 %-й интервал

погрешности, принятый в качестве допустимого. Отметим также, что задание минимальной длины притока 1-го порядка приводит к снижению оптимальных пороговых значений индексов при

калибровке по всем вариантам функции инициации, что вытекает из самого алгоритма калибровки.

Таблица 2. Результаты автоматической оцифровки речной сети по вариантам функций инициации с применением пороговой длины водотоков 1-го порядка

Table 2. Results of the automatic digitization of the river network according to variants of initiation functions using a threshold length for 1st-order streams

Вариант построения речной сети	Кол-во водотоков 1-го порядка, шт.	Мин. длина водотока 1-го порядка, пикс.	Общая длина речной сети, км	Изм. общей длины речной сети по сравн. с таблицей 1, %	Разница общей длины фактической и модельных речных сетей, %
Бассейн реки Адерба					
Топокарта	62	-	180,0	-	-
A	62	12	165,1	+2,4	-8,3
zA	62	12	165,3	+4,2	-8,2
zA ^{0,5}	62	12	166,5	+8,8	-7,5
Q	62	12	168,7	+3,3	-6,3
CEI	62	12	177,0	+10,3	-1,7
zQ ^{0,5}	62	12	169,6	+6,3	-5,8
H _c	62	12	137,9	+20,5	-23,4
Бассейн реки Пезуапсе					
Топокарта	131	-	268,5	-	-
A	131	12	253,0	+5,9	-5,8
zA	131	12	244,5	+12,1	-8,9
zA ^{0,5}	131	12	236,7	+12,1	-11,9
Q	131	12	247,5	+14,9	-7,8
CEI	131	12	240,4	+6,1	-10,5
zQ ^{0,5}	131	12	232,6	+10,9	-13,4
H _c	131	12	208,8	+14,5	-22,2
Бассейн реки Шахе					
Топокарта	351	-	668,8	-	-
A	351	12	570,9	+7,6	-14,6
zA	351	12	564,0	+12,5	-15,7
zA ^{0,5}	351	12	555,1	+19,1	-17,0
Q	351	12	573,5	+8,1	-14,2
CEI	351	12	561,2	+12,5	-16,1
zQ ^{0,5}	351	12	547,2	+18,2	-18,2
H _c	351	12	504,4	+24,2	-24,6

Модели с применением индекса среднего падения ΔH_c больше остальных реагируют на изменение минимальной длины притоков 1-го порядка, но эти варианты все же остаются худшими по признаку общей длины водотоков по

сравнению с остальными. Видно также, что различные функции инициации очень по-разному реагируют на задание минимальной длины притока 1-го порядка в различных бассейнах, различающихся высотой и интенсивностью

расчленения рельефа. Это подчёркивает необходимость поиска оптимального индекса, либо набора индексов, позволяющих параметризовать процесс формирования речной сети при существенных различиях комплекса действующих физико-географических факторов.

Анализ данных таблицы 2 наглядно показывает различное по качеству приближение модельных сетей к фактическим при применении различных индексов функции инициации. Для р. Адерба все индексы, кроме ΔH_c , дают приемлемый результат, при этом лучший результат со значительным отрывом дает индекс CEI . Для р. Псезуапсе также все индексы, кроме ΔH_c , дают приемлемый результат, но в среднем существенно худший. Лучшим индексом для р. Псезуапсе является индекс площади водосбора A , а следующий и довольно близкий результат дает индекс климатического стока Q . Для р. Шахе результаты в среднем гораздо хуже. Лучшим индексом является Q , следующий по качеству и почти неотличимый от лучшего результат дает индекс A , и лишь эти две модели укладываются в упомянутый выше допустимый интервал погрешности 15 %.

Все три исследуемых водосбора являются горными, но существенно различаются по степени «горности», т.е. по диапазону высот и контрастности рельефа, а также по всему комплексу тесно связанных с рельефом ландшафтных характеристик. Это можно проиллюстрировать на примере показателя средней высоты бассейнов р. Адербы, Псезуапсе и Шахе – 423, 925 и 1265 м, соответственно. Представляется возможным сформулировать гипотезу: поскольку ведущие факторы и характерные особенности эрозионного развития речных бассейнов существенно различны в разных ландшафтных обстановках, для моделирования речных сетей в широких географических следует применять разнообразные наборы индексов функции инициации, либо сложный комплексный индекс высокого уровня обобщения. Эта гипотеза определяет основное направление дальнейших исследований по проблематике.

Заключение

Назревшей проблемой развитие исследований в области наук о Земле является создание инструментария для детального и разнообразного анализа ЦМР в комплексе с другими наборами пространственных данных. Это обеспечит новые информационные и методические возможности, поскольку рельеф для них является фундаментально значимым фактором.

Программный инструмент Stream Network Order, реализованный в виде скрипта на базе возможностей ArcGIS Desktop 10.8, предназначен для моделирования речных сетей на основе ЦМР с использованием различных вариантов функции инициации. Перспективы его развития связаны с разработкой комплексных процедур анализа таких сложных и экстремально динамичных природных объектов, как речные системы.

Выполнено тестирование методов моделирования речной сети по ЦМР с использованием климатических пространственных данных, представляющих климатические характеристики. Использована авторская технология на примере 3 речных бассейнов Черноморского побережья Кавказа, с различными высотными характеристиками рельефа и тектонической активностью. Подтверждены основные преимущества технологии: принципиальное сокращение времени на выполнение полного цикла моделирования по сравнению с ручной обработкой; получение не только визуальной «отрисовки» модельного построения, но и обобщенных порядковых параметров и статистик речной сети; возможность использования инструмента широким кругом пользователей без специальной технической подготовки; возможность опционального вывода промежуточных результатов построения модели и дальнейшее их самостоятельное использование.

Выявлена и проработана методически концептуальная проблема т.н. «коротких» притоков, искажающая процесс калибровки моделей речной сети и препятствующая получению адекватных результатов. Обосновано и выполнено усовершенствование алгоритма моделирования речной сети, в результате чего

предложена оригинальная модель с двумя калибруемыми параметрами, в которой принцип порога эрозионного действия дополнен принципом порога минимального масштаба развитой речной системы. В процессе испытаний сформулировано предположение, что в разных ландшафтных обстановках для моделирования речных сетей следует применять разнообразные наборы индексов функции инициации, либо сложный комплексный индекс высокого уровня обобщения.

Литература

- Albers H. C. Beschreibung einer neuen Kegelprojection. (von Zach's) *Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels-Kunde*. 12: 450–459. November 1805. Available at: <https://www.digitale-sammlungen.de/de/view/bsb10538604?page=474,475>
- Gartsman B.I. Entin A.L. Shekman E.A. Special tools for structural and hydrographic analysis of river systems in the ArcMap environment // *Water Resources*. 2024. V. 51. Is. 3. P. 171–184. DOI: 10.1134/S0097807824700726
- Gupta V.K. Emergence of statistical scaling in floods on Channel networks from complex runoff dynamics // *Chaos, Solitons and Fractals*. 2004. V. 19. Iss. 2. Pp. 357–365. DOI: 10.1016/S0960-0779(03)00048-1
- Laurence Hawker et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. 2022 *Environ. Res. Lett.* 17. DOI: 0.1088/1748-9326/ac4d4f
- Lee K.T. Chang C.H. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology based IUH modeling // *Journal of Hydrology*. 2005. V. 311. Iss. 1–4. Pp. 91–105. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.01.008
- Reggiani P. Sivapalan M. Hassanizaden S.M. Gray W.G. Coupled equations for mass and momentum balance in a stream network: Theoretical derivation and computational experiments // *Proc. R. Soc. Lond. A*. 2001. V. 457. Pp. 157–189. DOI: 10.1098/rspa.2000.0661
- Rodriguez-Iturbe I. Rinaldo A. *Fractal river basins: chance and self-organization*. Cambridge University Press, 1997. 547 p.
- Yen B.C. Lee K.T. Unit hydrograph derivation for ungauged watersheds by stream order laws // *Jour. of*

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИВП РАН FMWZ-2022-0001 № гос. рег. 122041100222–7.

Acknowledgements

This study was carried out under Governmental Order to Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, subject no FMWZ-2022-0001.

References

- Albers H. C. "Beschreibung einer neuen Kegelprojection". (von Zach's) *Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels-Kunde*. 12: 450–459. November 1805. Available at: <https://www.digitale-sammlungen.de/de/view/bsb10538604?page=474,475>.
- Alekseevskii N.I. Masshtabnye izmeneniya kharakteristik sistemy potok-ruslo po dline rek [Large-scale changes in the characteristics of the stream-channel system along the length of rivers]. *Fundamental'nye problemy vody i vodnykh resursov. Materialy 3 vseross. konf. 24-28 avgusta 2010 [Fundamental Problems of Water and Water Resources. Proceedings of the Third All-Russian Conf., August 24-28, 2010]*, Barnaul, 2010, pp.4–6. (In Russian).
- Eremenko E.A., Panin A.V. *Lozhbinnyi mezorel'ef Vostochno-Evropeiskoi ravniny [The gully mesorelief of the East European Plain]*. Moscow, MIROS Publ., 2010. 192 p. (In Russian).
- Gartsman B.I. Analiz geomorfologicheskikh uslovii formirovaniya pervichnykh vodotokov na osnove tsifrovyykh modelei rel'efa [Analysis of geomorphological conditions for primary streams formation using digital elevation models]. *Geografiya i prirod. resursy [Geography and Natural Resources (Russia)]*, 2013, vol. 1, pp.136–147. (In Russian).
- Gartsman B.I., Bugaets A.N., Tegai N.D. Krasnopeev S.M. Analiz struktury rechnykh sistem i perspektivy modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov [Analysis of the structure of river systems and the prospects for modeling hydrological processes] *Geografiya i prirod. resursy [Geography and Natural Resources (Russia)]*, 2008, vol. 2, pp. 116–123. (In Russian).

- Hydrol. Engin.1997. Vol. 2. Iss. 1. Pp. 1–9. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(1997)2:1(1)
- Алексеевский Н.И. Масштабные изменения характеристик системы поток-русло по длине рек / Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. Мат-лы 3-й всеросс. конф. 24-28 августа 2010. Барнаул. 2010. С. 4–6.
- Гарцман Б.И. Анализ геоморфологических условий формирования первичных водотоков на основе цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. 2013. № 1. С. 136–147.
- Гарцман Б.И. Бугаец А.Н. Тегай Н.Д. Краснопеев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природ. ресурсы. 2008. № 2. С. 116–123.
- Гарцман Б.И. Галанин А.А. Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 27–37.
- Гарцман Б.И. Шекман Е.А. Возможности моделирования речной сети на основе ГИС-инструментария и цифровой модели рельефа // Метеорология и гидрология. 2016. № 1. С. 86–98.
- Гарцман Б.И. Шекман Е.А. Ли К.Т. Порядковая классификация речных водоразделов на основе обработки цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. 2016. № 4. С. 164–173.
- Гарцман И.Н. Топология речных систем и гидрографические индикационные исследования // Водн. ресурсы, 1973. №3. С. 109–124.
- Еременко Е.А. Панин А.В. Ложбинный мезорельеф Восточно-Европейской равнины. М.: МИРОС, 2010. 192 с.
- Казанский Б.А. Теоретические закономерности распределения речных структур / Тр. ДВНИГМИ. Вып. 63. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 85–90.
- Карасев, М.С. Худяков Г.И. Речные системы (на примере Дальнего Востока). М.: Наука, 1984. 143 с.
- Клименко В.И. Куканов В.М. Прокофьев С.С. Подземные воды Черноморского побережья Кавказа и их охрана. М.: Наука, 1979. 100 с.
- Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Ин-т геогр. СО РАН, 2001. 163 с.
- Gartsman B.I., Entin A.L., Shekman E.A. Special tools for structural and hydrographic analysis of river systems in the ArcMap environment. *Water Resources*, 2024, vol. 51, iss. 3, P. 171–184. DOI: 10.1134/S0097807824700726.
- Gartsman B.I., Galanin A.A. Strukturno-gidrograficheskii i morfometricheskii analiz rechnykh sistem: teoreticheskie aspekty [Structural-hydrographic and morphometric analysis of river systems: theoretical aspects]. *Geografiya i prirod. resursy [Geography and Natural Resources (Russia)]*, 2011, № 3, pp. 27–37. (In Russian).
- Gartsman B.I., Shekman E.A., Li K.T. Poryadkovaya klassifikatsiya rechnykh vodorazdelov na osnove obrabotki tsifrovyykh modelei rel'efa [Order classification of river watershed divides based on processing digital elevation models]. *Geografiya i prirod. resursy [Geography and Natural Resources (Russia)]*, 2016, vol. 4, pp. 164–173. (In Russian).
- Gartsman B.I. Shekman E.A. Vozmozhnosti modelirovaniya rechnoi seti na osnove GIS-instrumentariya i tsifrovoi modeli rel'efa [Potential of river network modeling based on gis technologies and digital elevation model]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russian Meteorology and Hydrology]*, 2016, vol. 1, pp. 86–98. (In Russian).
- Gartsman I.N. Topologiya rechnykh sistem i gidrograficheskie indikatsionnye issledovaniya [The topology of river systems and hydrographic indicator studies]. *Vodnye resursy [Water Resources]*, 1973, vol. 3, pp. 109–124. (In Russian).
- Gupta V.K. Emergence of statistical scaling in floods on Channel networks from complex runoff dynamics. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2004, vol. 19, iss. 2, pp. 357–365. DOI: 10.1016/S0960-0779(03)00048-1.
- Karasev M.S., Khudyakov G.I. *Rechnye sistemy (na primere Dal'nego Vostoka) [River systems (using the example of the Russian Far East)]*. Moscow, Nauka Publ., 1984, 143 p. (In Russian).
- Kazanskii B.A. *Teoreticheskie zakonomernosti raspredeleniya rechnykh struktur [Theoretical patterns of river structure distribution]*. Tr. DVNIGMI, Vyp. 63, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977, p. 85–90. (In Russian).
- Klimenko V.I., Kukanov V.M., Prokofev S.S. *Podzemnye vody Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza i ikh okhrana [Groundwater of the Black Sea*

- Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Западное Закавказье / под ред. Т. Н. Джапаридзе. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 224 с.
- Руководство по картографическим и картоиздательским работам. Часть 1. Составление и подготовка к изданию топографических карт масштабов 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000. – М.: Редакционно-издательский отдел ВТС, 1978 – 131 с.
- Сидорчук А.Ю. Фрактальная геометрия речных сетей // Геоморфология. 2014. №1. С. 3–14.
- coast of the Caucasus and their protection]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 100 p. (In Russian).
- Korytnyi L.M. *Basseinovaya kontseptsiya v prirodopol'zovanii [The basin concept in environmental management]*. Irkutsk, In-t geogr. SO RAN, 2001, 163 p. (In Russian).
- Laurence Hawker et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17. DOI: 0.1088/1748-9326/ac4d4f.
- Lee K.T., Chang C.H. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology based IUH modeling. *Journal of Hydrology*, 2005, vol. 311, iss. 1–4, pp. 91–105. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.01.008.
- Reggiani P., Sivapalan M., Hassanizaden S.M., Gray W.G. Coupled equations for mass and momentum balance in a stream network: Theoretical derivation and computational experiments. *Proc. R. Soc. Lond. A*. 2001, vol. 457, pp. 157–189. DOI: 10.1098/rspa.2000.0661.
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 9. Zakavkaz'e i Dagestan. Vyp. 1. Zapadnoe Zakavkaz'e [Surface Water Resources of the USSR: Hydrological Study. Vol. 9. Transcaucasia and Dagestan. Issue 1. Western Transcaucasia]* Ed. by T. N. Dzhaparidze. – Leningrad, Gidrometeoizdat, 1964, 224 p. (In Russian) .
- Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A. *Fractal river basins: chance and self-organization*. Cambridge University Press, 1997, 547 p.
- Rukovodstvo po kartograficheskim i kartoizdatel'skim rabotam. Chast' 1. Sostavlenie i podgotovka k izdaniyu topograficheskikh kart masshtabov 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000*. Moscow, Redaktsionno-izdatel'skii otdel VTS, 1978, 131 p. (In Russian).
- Sidorchuk A.Yu. Fraktal'naya geometriya rechnykh setei [Fractal geometry of the river network]. *Geomorfologiya [Geomorphology]*, 2014, vol. 1, pp. 3–14. (In Russian; summary in English).
- Yen B.C., Lee K.T. Unit hydrograph derivation for ungauged watersheds by stream order laws. *Jour. of Hydrol. Engin.* 1997, vol. 2., iss. 1. pp. 1–9. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(1997)2:1(1).