

ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ

УДК 551.4:571.6

МЕРЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ РЕЧНЫХ СИСТЕМ
КАК ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ
ГОР КРЫМА И ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА)¹

© 2022 г. Б. И. Гарцман^{a, b, *}, П. А. Белякова^a, К. В. Сучкова^a,
Е. А. Шекман^b, А. Л. Энтин^c

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bТихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия

^cМГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

*e-mail: gartsman@inbox.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 28.02.2022 г.

Основной мерой речных систем традиционно признается площадь водосбора, которая определяет его главную функцию – собирать атмосферные осадки. Однако речной бассейн имеет также объем и вертикальную протяженность. Необходимость учета объема речного бассейна и методической разработки понятия о его вертикальной протяженности (условно – “толщине”) следует как из общеметодологических соображений, так и из имеющегося опыта гидрологических исследований. Предложен комплекс новых оценок “толщины” и объема бассейна, характеризующих, в частности, его врез, вертикальную расчлененность, мощность зоны активного водообмена и др. Эти показатели могут существенно усилить эффективность методов структурно-гидрографической индикации в направлении анализа эрозионно-аккумулятивных процессов, стока наносов, а в регионах с явным преобладанием подземного питания – и в части параметров стока воды. Для демонстрации эффективности предложенных показателей выполнен анализ речных систем, развивающихся в контрастных геологических условиях – в Горном Крыму и в южном секторе Черноморского побережья Кавказа. Расширение инструментария, повышение детальности и информативности анализа рельефа могут иметь универсальную ценность и самую широкую область приложений в науках о Земле.

Ключевые слова: речные системы, структурно-гидрографический анализ, морфометрические характеристики рельефа, врез речной сети, вертикальная расчлененность бассейна.

DOI: 10.31857/S032105962204006X

ВВЕДЕНИЕ

Основной мерой речных систем традиционно признается площадь водосбора, ограниченного поверхностными водоразделами. Именно площадью определяется главная функция водосбора – собирать атмосферные осадки для преобразования в речной сток. Однако речной бассейн – трехмерное природное тело, т. е. он имеет объем, а также и вертикальную протяженность. В равнинных условиях она измеряется метрами и несколькими десятками метров (что несопоставимо с горизонтальными размерами бассейнов), слабо варьирует в пространстве и почти не учитывается как фактор формирования речного стока.

В качестве примера подобного учета можно упомянуть зависимости модуля речного стока от площади водосбора в диапазоне малых бассейнов (например, [10], с. 271). Модули обычно растут с площадью до достижения предельного значения, определяющего пороговое значение площади малой реки. Это объясняется увеличением глубины вреза речной системы, что сопровождается ростом подземного питания. Характерно, что и в данном случае операционной переменной выступает площадь водосбора, используемая для индикации глубины вреза.

В горах вертикальная протяженность (условно – “толщина”) даже небольших бассейнов достигает сотен и нескольких тысяч метров, чем обусловлены их очевидные отличия от равнинных бассейнов такой же площади. Роль “толщины” бассейна, выражаемой различными характеристиками вертикальной расчлененности рельефа, в этом

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-05-00353 в рамках тем FMWZ-2022-0001 и 0126-2021-0001, государственная регистрация 121040700170-9), Государственного задания ИВП РАН.

случае очень существенна. Наиболее известное отражение этого факта — использование концепции высотной поясности для горных бассейнов ([10], с. 270). Однако высотной поясности подчиняются распределения климатических факторов в зависимости от абсолютной высоты [15, 16], при этом трехмерное строение самого бассейна остается за рамками рассмотрения.

Принципиальная необходимость учета объема речного бассейна и методической разработки понятия его “толщины” следует как из общеметодологических соображений, так и из имеющегося опыта гидрологических исследований. Однако прямым общеупотребительным термином для “толщины” бассейна гидрология суши не располагает, систематического ее использования в анализе и расчетах нет. Для этого есть, как минимум, две причины.

Во-первых, в отличие от формально вполне строгого понятия площади водосбора, предложить формализованное определение “толщины” бассейна очень не просто. Сложность строения рельефа бассейна уже затрудняет строгое определение “толщины”, а необходимость учета переменной толщины зоны аэрации и активного водообмена, подстилаемой сложной, притом скрытой от наблюдения, поверхностью водоупора, делает такое определение пока просто невозможным. Поэтому термин “толщина” применительно к речному бассейну употребляется в кавычках. Родственными ему можно считать такие термины, как вертикальная расчлененность рельефа, врез, мощность зоны активного водообмена и другое, чья смысловая нагрузка отражает различные аспекты “толщины” бассейна.

Наиболее развитым методическим аппаратом анализа вертикальной протяженности рельефа располагает, естественно, геоморфология. Методы построения карт глубины расчленения рельефа, называемых также картами интенсивности вертикального расчленения, глубины местных базисов эрозии, относительных высот (превышений), вошли в основной инструментарий этой науки с первой половины XX в. [19] и до настоящего времени остаются предметом активной теоретической разработки и прикладного использования [2, 18, 22]. Существенным недостатком указанных работ следует считать относительно слабое внимание к использованию современных цифровых данных о рельефе и информационных технологий их обработки.

Во-вторых, в отличие от сравнительно простой и точной процедуры измерения площади водосбора [1], любые измерения вертикальных характеристик рельефа по двумерной его проекции на топографической карте слишком сложны и трудоемки для массовой реализации. Появление общедоступных цифровых моделей рельефа (ЦМР)

и геоинформационного программного обеспечения создает существенно новые возможности в этом смысле, но требует значительных усилий в части методических разработок и создания необходимых алгоритмов.

Широкое развитие методы морфологического анализа речных бассейнов получили за рубежом [34]. Если до появления ЦМР и ГИС преобладали эмпирические исследования планового рисунка речных сетей, то затем начало развиваться направление математического моделирования эрозионного развития рельефа бассейна и речной сети, основанного на базовых физических законах. Поэтапное развитие данного подхода [23, 27, 30] привело к разработке трехмерной модели “самоорганизованной фрактальной речной сети” [33–35, 29]. Одновременно с теоретическим направлением продолжает развиваться и направление эмпирического анализа рельефа, основанное на разработке и применении различных геоморфологических индексов [7, 24].

Общим ограничением при этом можно считать применение уклона в качестве основного показателя, учитывающего высотный диапазон рельефа. Уклон поверхности элементарной площадки (ячейки ЦМР) используется практически во всех формах геоморфологических индексов; корректное воспроизведение распределения локальных уклонов — одна из ключевых задач моделирования эрозионного развития рельефа. Однако представляется необходимым иметь также нелокальные характеристики высотного диапазона рельефа, отражающие как свойства бассейна в целом, так и положения отдельных элементарных площадок в трехмерной структуре бассейна.

При широком распространении карстующихся пород и карстовых явлений врез (вертикальная расчлененность) бассейна, вероятно, становится фактором, определяющим водность речной системы. Прежде всего это обусловлено значительными несовпадениями подземных водоразделов с поверхностными, так что последние не характеризуют реальные границы водосбора. Рассмотрим систематически, какие показатели “толщины” бассейна возможно получить с использованием современных ЦМР и средств их обработки, и каким образом эти показатели могут характеризовать речную систему. Для примера эффективности выбранных показателей выполним анализ речных систем, развивающихся относительно недалеко друг от друга, но в контрастных геологических условиях — в Горном Крыму и в южном секторе Черноморского побережья Кавказа [16].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ РЕЧНОГО БАССЕЙНА

Традиционные характеристики

Чаще всего как мера вертикальной протяженности бассейна употребляется диапазон высот ΔH_b – разность максимальной и минимальной (в замыкающем створе) отметок рельефа в пределах бассейна. Достоинство показателя – простота его определения. Высокое значение ΔH_b указывает на наличие в бассейне гор, однако разнообразие морфологического строения бассейна, особенно крупного, при одних и тех же значениях ΔH_b очень велико. Возможности содержательной интерпретации диапазона высот ограничены, а без учета размеров бассейна и региональных особенностей рельефа – просто слабы.

В качестве показателей горного характера и вертикальной расчлененности бассейна используются также его средняя высота \bar{H}_b и средний уклон \bar{i}_b . Их недостаток – осреднение по всей площади бассейна, в том числе достаточно крупного, т. е. избыточный уровень генерализации (как и для ΔH_b). При этом достоинство простоты определения утрачивается – расчет \bar{H}_b и, в особенности, \bar{i}_b на основе топографических карт представляет собой сложную, трудозатратную и чреватую техническими ошибками процедуру. Три перечисленных показателя используются как при составлении гидрографических описаний бассейнов, так и в географическом анализе речного стока – в качестве переменных в региональных зависимостях.

Оценки вертикальной протяженности бассейна на основе ЦМР

Как упоминалось ранее [3], использование ЦМР и средств их обработки не только многократно сокращает время и усилия по определению гидрографических и морфометрических показателей бассейнов. Более важно, что современная технологическая база позволяет принципиально улучшить пространственную детализацию определения параметров рельефа, а также разнообразить алгоритмы вычисления определяемых характеристик, что приводит к необходимости их нового осмысления. То есть при разработке данной проблематики методический аспект должен преобладать над технологическим. Исходя из этого рассмотрим группу параметров, характеризующих вертикальную протяженность (врез, вертикальное расчленение) речного бассейна, их интерпретацию и возможности определения по ЦМР.

В работе [5] предложена характеристика бассейна, которую можно назвать “толщиной (объемом) по экстремумам”. Она, как и ряд последующих, рассчитывается по сетке частных во-

досборов, получаемых в процессе стандартной процедуры выделения речной сети, реализованной в ArcGIS и многих других программных средствах ГИС [4]. Сначала речная сеть выделяется как совокупность ячеек раstra ЦМР с площадью водосбора выше заданной пороговой величины. Затем неструктурированная древовидная речная сеть разбивается на элементарные бесприточные сегменты-водотоки (в терминологии ArcGIS – links), для каждого из которых строятся частные водосборы. Вся площадь бассейна представляется в форме растровой мозаики частных водосборов, с каждым из которых связан элементарный водоток – сегмент растровой речной сети. Количество частных водосборов N при разбивке бассейна зависит от величины пороговой площади, которая может определяться согласно независимым и различным соображениям. Для разумной пространственной детализации характеристик рельефа N должно составлять, по-видимому, несколько сотен.

“Толщиной по экстремумам” ΔH_e назовем средневзвешенный диапазон высот бассейна, вычисляемый по экстремальным точкам рельефа частных водосборов в соответствии с выражением

$$\Delta H_e = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{\max i} - H_{\min i}) F_i}{\sum_{i=1}^N F_i}, \quad (1)$$

где $H_{\max i}$, $H_{\min i}$ – максимальная и минимальная отметки рельефа, F_i – площадь i -го частного водосбора. Умножением ΔH_e на площадь бассейна получим его “объем по экстремумам” V_e . Эти характеристики связаны с оценкой полного эрозионного вреза в бассейне. Согласно классической концепции эрозионного цикла [11], врезание речной сети происходит от некоторой первичной выровненной поверхности. Пока на самых высоких уровнях водоразделов сохраняются ее фрагменты, оценку полного эрозионного вреза величиной ΔH_e можно считать адекватной и достаточно точной. Однако реальные процессы развития рельефа редко укладываются в классическую схему – чаще первичная поверхность бывает полностью уничтожена к текущему моменту, либо само ее существование как исходной стадии многоэтапной эволюции рельефа представляется сомнительным. В этом случае характеристики ΔH_e и V_e правильнее интерпретировать как максимальную (“сверху”) оценку исходного массива геологического субстрата, эрозионное расчленение которого привело к формированию современного рельефа бассейна [20].

Определение величины ΔH_e в геоинформационном ПО выполняется на основе вычисления зональной статистики – в качестве матрицы ис-

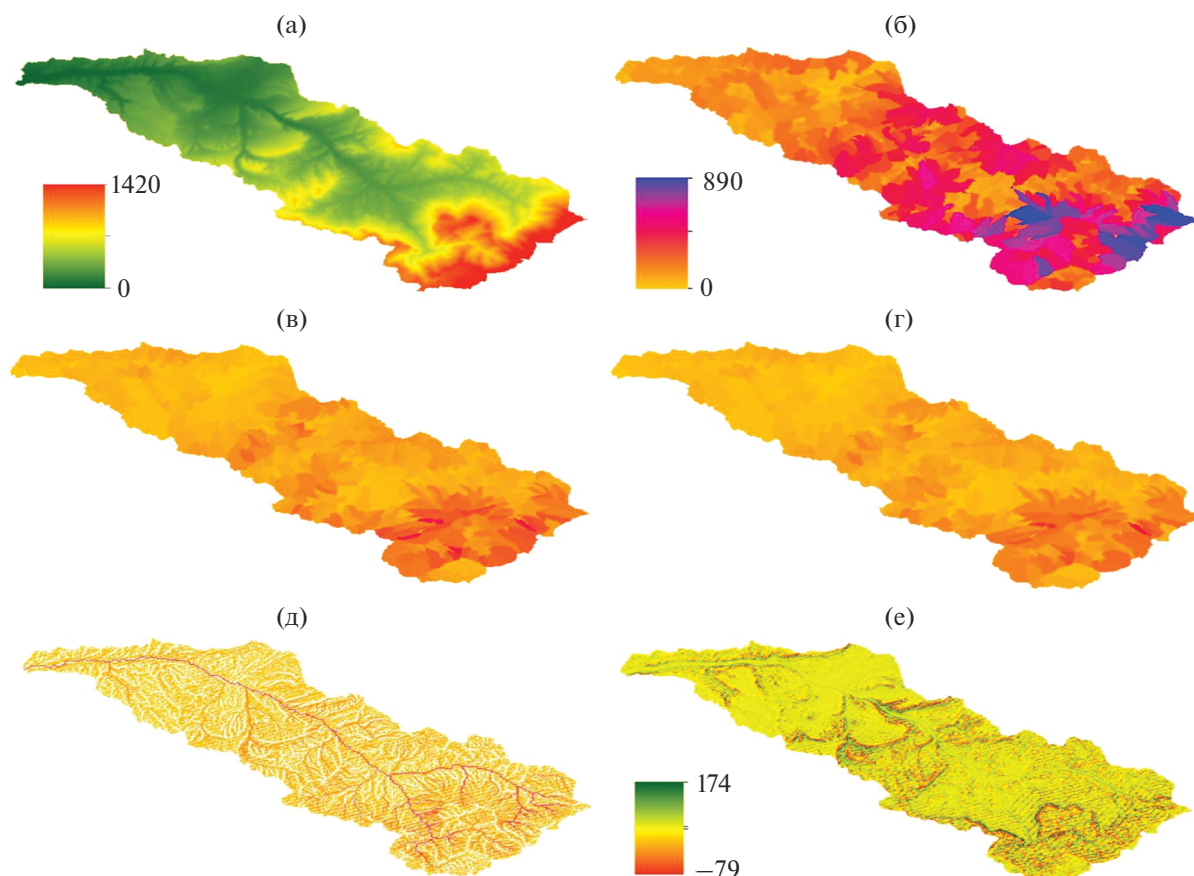


Рис. 1. Характеристики вертикальной протяженности на примере бассейна р. Бельбек: а – абсолютная высота рельефа H , м; б – “толщина по экстремумам” ΔH_e , м; в – “толщина по водоразделам” ΔH_w , м; г – “толщина по средним” ΔH_a , м; д – средний врез бассейна ΔH_c , м (белым цветом обозначены пиксели с отсутствием вреза); е – разность расчетных уклонов i_g и i_s , %. б–д – в единой вертикальной шкале.

ходных значений используется ЦМР, а зонами для агрегирования являются частные водосборы. В среде ArcGIS эта операция может быть выполнена с помощью инструмента “Spatial Analyst Tools/Zonal Statistics as Table”. Данный инструмент на выходе создает таблицу площадей (“Area”) и диапазона высот (“Range”) для всех частных водосборов. Пример исходной ЦМР речного бассейна приведен на рис. 1а, а расчетного покрытия, отражающего значения ΔH_e по сетке частных водосборов, – на рис. 1б.

Еще одна характеристика вертикальной мощности бассейна может быть названа “толщиной по водоразделам” – ΔH_w . Она вычисляется подобно ΔH_e как средневзвешенная разность высот водоразделов и водотоков. Расчетная формула для ΔH_w отличается от формулы (1) только заменой максимальной и минимальной высот на средние высоты водоразделов и водотоков для всех частных водосборов бассейна. К водоразделам относятся все краевые пиксели частных водосборов с нулевым размером водосбора. В ArcGIS выделить

краевые пиксели позволяет инструмент “Spatial Analyst Tools/Neighborhood/Focal Statistics”, который вычисляет среднее значение индекса частного водосбора по окрестности каждого пиксела 3×3 . Для пикселей, лежащих по краю частных водосборов, эти средние значения отличаются от их собственных индексов. Затем с помощью инструмента “Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator” создается растровая структура водоразделов, куда включаются только пиксели, для которых выполняется условие краевого положения, и при этом инструмент “Spatial Analyst Tools/Hydrology/Flow Accumulation” дает результат, равный 0.

Пиксели растровой структуры водоразделов наследуют индексы частных водосборов так же, как и пиксели водотоков растровой речной сети. Определение величины ΔH_w также опирается на зональную статистику, которая считается дважды: отдельно по высотам водораздельных пикселей и отдельно по высотам пикселей водотоков. В результате получаем значения площадей (“Ar-

ea”), средних высот водоразделов и водотоков (“Mean”) для всех частных водосборов. Умножением ΔH_w на площадь бассейна, можно получить его “объем по водоразделам” V_w . Эти оценки отображают диапазон высот между существующими водораздельной и тальвеговой поверхностями, т. е. актуальный врез бассейна, что характеризует возможные напоры в пределах зоны активного водообмена. Величины ΔH_w и V_w всегда меньше значений ΔH_e и V_e . Пример расчетного покрытия ΔH_w приведен на рис. 1в.

Третья мера такого же типа может быть названа “толщиной по средним” – ΔH_a – средневзвешенная разность высот водосборов и водотоков. Ее расчет выполняется также по формуле, аналогичной формуле (1), только в данном случае используются средние высоты частных водосборов и сегментов-водотоков. Умножением ΔH_a на площадь бассейна, получим его “объем по средним” V_a . Эти оценки отображают средний слой и объем горных пород, находящихся выше локальных базисов эрозии (близлежащих тальвегов), т. е. мощность зоны активного водообмена и объем экспонированного геологического субстрата [20]. Для определения величины ΔH_a нужно дважды выполнить расчет зональной статистики: сначала по растру высот с использованием мозаики частных водосборов в качестве маски, затем также по растру высот с использованием в качестве маски структуры сегментов-водотоков. В результате получаем значения площадей (“Area”), средних высот частных водосборов и водотоков (“Mean”). Величины ΔH_a и V_a всегда меньше значений ΔH_w и V_w , и тем более – значений ΔH_e и V_e . Пример расчетного слоя ΔH_a приведен на рис. 1г.

Содержательная интерпретация возможна и для отношений описываемых мер. Например, показатель $K_{ea} = \Delta H_a / \Delta H_e$ отражает долю остаточного рельефа, сохранившегося в процессе развития эрозионного цикла. Аналогичный показатель $K_{wa} = \Delta H_a / \Delta H_w$ – интегральный индикатор формы рельефа, который будет больше либо меньше 0.5 в зависимости от преобладания выпуклых либо вогнутых склонов.

Все перечисленные выше характеристики вертикальной протяженности бассейна вычисляются по дискретной мозаике частных водосборов и обусловлены их характерным размером. Представляет интерес вычисление меры, отражающей вертикальный врез бассейна непрерывно в каждой его точке – ΔH_c . Для этого необходимо дважды применить к растру направлений стекания в бассейне процедуру расчета водосборной площади (в ArcGIS это инструмент “Spatial Analyst Tools/Hydrology/Flow Accumulation”) – сначала без дополнительных опций, а затем с назначением ЦМР в качестве весовой функции (“weight ras-

ter”). Первая операция даст в каждом пикселе площадь его водосбора, вторая – сумму высот по водосбору данного пиксела. Разделив второй полученный растр на первый (в ArcGIS – с помощью “Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator”), получим в каждом пикселе среднюю высоту его водосбора. После вычитания высот самих пикселей получим в каждом из них превышение средней высоты его водосбора над высотой замыкающего створа – текущий средний врез водосбора в данной точке ΔH_c (рис. 1д). Умножив ΔH_c на площадь водосбора в каждом пикселе, получим накопленный объем бассейна V_c , непрерывно возрастающий при движении вниз по линиям тока. Обе величины – ΔH_c и V_c – в силу их непрерывности могут применяться в качестве индексов при автоматизированном выделении речной сети, что подробно обсуждается ниже.

Оценки уклонов поверхности бассейна на основе ЦМР

Уклон (крутизна склона) – это локальная морфометрическая величина, которая может быть вычислена для каждого пиксела ЦМР на основе двух различных подходов. В рамках первого подхода за крутизну поверхности i_s в пикселе принимается максимальный из уклонов линий, соединяющих его центр с центрами соседних. Эти уклоны вычисляются как отношение разности высот к расстоянию между центрами [36]. Второй подход состоит в применении методов дифференциальной геометрии – крутизна поверхности i_g определяется как угол между отвесной линией и нормалью к поверхности ЦМР, построенной в центре данного пиксела. Поле высот представляется как функция плановых координат $H(x, y)$, которая аппроксимируется полиномом некоторой степени в окрестности пиксела 3×3 , затем вычисляются значения вторых частных производных высоты по координатам [21, 36].

Как правило, говоря о “крутизне склона”, вычисляемой средствами ГИС, имеют в виду второй подход. В частности, таким образом рассчитывается уклон в ArcGIS при помощи инструмента “Spatial Analyst Tools/Surface/Slope”. Однако уклон, применяемый в гидрологических и гидравлических расчетах, соответствует скорее первому подходу (i_s). Этот уклон также может быть вычислен в ArcGIS при определении направлений стока (инструмент “Spatial Analyst Tools/Hydrology/Flow Direction”) в виде опционального выходного набора данных (“drop raster”). Значения i_g и i_s в общем случае различаются, хотя тесно коррелируют друг с другом. Заметные расхождения между ними (в обе стороны) наблюдаются в экстремальных точках и на линиях переломов рельефа (рис. 1е).

Автоматическое выделение (моделирование) речной сети

Автоматическое выделение речной сети на основе учета среднего вреза водосбора ΔH_c может быть использована для верификации роли этого фактора на примере анализа небольшого числа исследуемых объектов. Обычно моделирование речной сети по ЦМР [3, 5, 7, 35] выполняется путем выделения пикселей, в которых превышено пороговое значение некоторого индекса, характеризующего условия формирования первичного водотока. Основу таких индексов чаще всего составляет произведение накопленного расхода воды на местный уклон, причем обе эти характеристики могут быть взяты с различными коэффициентами и показателями степени. Стандартный для ГИС алгоритм выделения речной сети по пороговому значению площади водосбора представляет собой частный случай данного подхода, когда площадь рассматривается как индикатор расхода, а вариациями местных уклонов пренебрегают.

В работах [3, 5, 7, 35] описаны процедуры сопоставления результатов оцифровки речной сети по ЦМР с использованием различных индексов и реальной речной сети, оцифрованной вручную с топографических карт определенного масштаба. Применались варианты тонкого анализа сходства—различия полученных сетей для выявления наиболее подходящего индекса для выделения, т. е. фактически для выбора наиболее адекватной модели формирования первичного водотока. Аналогичную, но более “грубую” процедуру применим для сопоставления факторов формирования речной сети по степени их значимости. При такой постановке задачи будем сравнивать лишь общий рисунок речных сетей без детализации; соответственно, выводы будут более общими и качественными. Используемый метод концептуально сходен с примененным в исследовании [32].

С этой целью модели речной сети, полученной на основе площади водосбора, противопоставим модель, полученную на основе использования среднего вреза бассейна в качестве индекса. Речные сети, смоделированные на основе разных индексов, сравним с речной сетью, отображаемой на топографических картах среднего масштаба (“реальная сеть”). Автоматическое выделение всегда включает в себя этап калибровки порогового значения индекса для получения наилучшего совпадения расчетной и фактической речных сетей по заданной мере сходства. Используется самая простая и устойчивая мера — количество истоков (водотоков 1-го прядка) в речной системе, называемая также ее мощностью [13].

ОПИСАНИЕ РАЙОНОВ И ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ структуры речной сети и рельефа выполнен для четырех речных бассейнов (рис. 2), два из которых расположены в горной части Крыма, еще два — в южном секторе Черноморского побережья Кавказа. Для моделирования речной сети использовался фрагмент общедоступной ЦМР с разрешением 3 арк. сек MERIT [31], приведенный к равноплощадной проекции *Europe Abers Equal Area Conic40* с размером пиксела 75×75 м. В качестве реальной речной сети используются результаты ее ручной оцифровки с топографических карт масштаба 1 : 100000.

Территорию п-ова Крым можно разделить на три части: южную — горную, северную — равнинную (степную) и восточную [9]. Горная часть простирается примерно на 150 км вдоль южного побережья в виде полосы шириной ~50 км и включает в себя три горных гряды: Главную, Внутреннюю и Внешнюю. Наибольшую высоту имеет Главная гряда, отметки ее вершин — от 1000 до 1545 м. Большая часть вершинной поверхности Главной гряды представлена возвышенными плато (яйлами), на которых массово развиты карстовые формы рельефа (воронки, колодцы и т.д.). В уступах отдельных плато и в разделяющих их пространствах развиты эрозионные формы рельефа — крутые склоны, ущелья и врезанные V-образные долины глубиной от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Высоты Внутренней и Внешней гряды в среднем составляют 500–600 и 200–350 м соответственно. Внешняя гряда, плавно понижаясь, переходит в равнину, имеющую слабый наклон на СЗ. Степная часть полуострова составляет ~4/5 его площади, имеет равнинный рельеф, в предгорьях — сильно расчлененный долинами рек.

Главная гряда Крымских гор сложена дислоцированными отложениями триаса, юры и местами — нижнего мела. Севернее на этом комплексе пород несогласно залегают меловые, палеогеновые и неогеновые отложения, слагающие моноклиналильные предгорные гряды. Равнинная часть Крыма — часть эпигерцинской платформы, с поверхности сложенная спокойно залегающими отложениями неогена. На глубине залегают палеогеновые и меловые отложения [9]. Главные реки северного макросклона Крымских гор протекают по двум основным тектоническим структурам: Южно-Крымскому мезозойско-кайнозойскому орогену и Скифской плите, охватывая все разнообразие геологических пород — от самых древних пород таврической серии до самых молодых сарматских. Карстовые явления, характерные для карбонатной толщи верхней юры, наиболее развиты в верхней части Южно-Крымского орогена, сложенного в основном осадочными породами

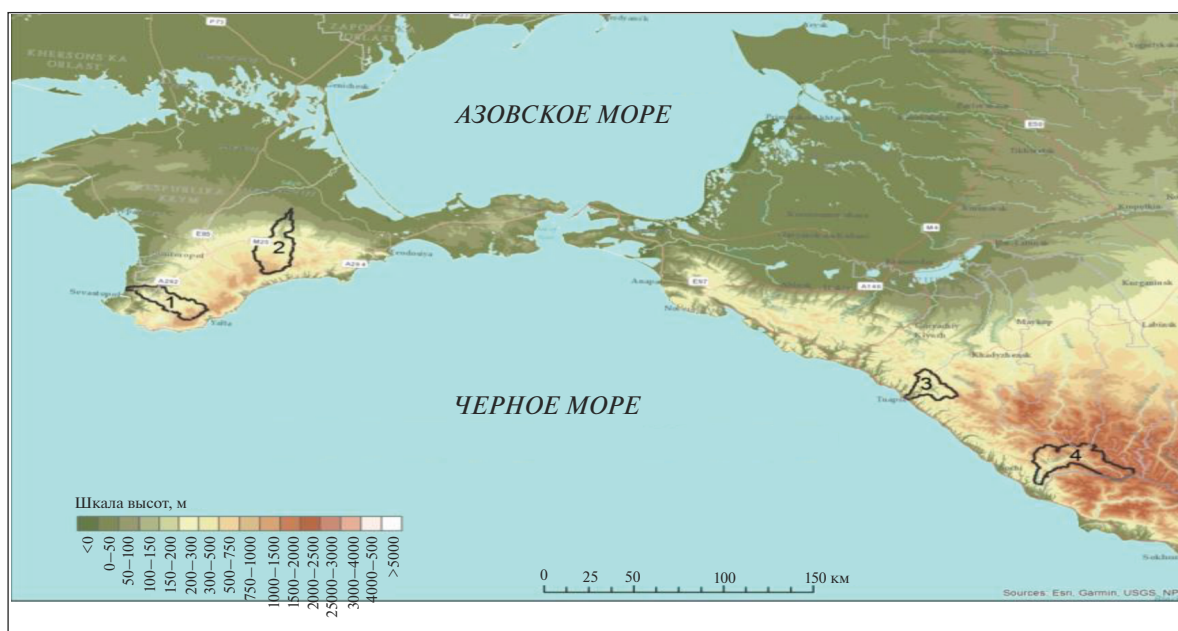


Рис. 2. Карта района исследований и расположение экспериментальных бассейнов рек: 1 – Бельбек; 2 – Биюк-Карасу; 3 – Туапсе; 4 – Мзымта.

среднеюрского и верхнеюрского возраста. Через сильно закарстованные верхнеюрские известняки, подстилаемые водонепроницаемыми породами таврической серии и средней юры, происходит движение трещинных и трещинно-карстовых подземных вод, свободно сообщающихся с дневной поверхностью и движущихся под дренирующим воздействием поверхностных эрозионных процессов.

Горный Крым отличается влажным, умеренно теплым климатом с выраженной вертикальной зональностью. Средняя годовая температура воздуха $\sim +6^{\circ}\text{C}$. Здесь выпадает наибольшее количество осадков – 1000–1200 мм/год, в отличие от степной части полуострова – 325–450 мм/год. В пределах северного макросклона для анализа выбраны два бассейна – р. Бельбек до устья и р. Биюк-Карасу в верхнем и среднем течении до начала бесприточного равнинного участка. По классификации водного режима Б.Д. Зайкова, обе реки относятся к крымскому типу [15], характеризующемуся паводками в течение большей части года, за исключением периодов летней или летне-осенней межени. Важную, пока еще недостаточно изученную, роль в питании рек Крыма играют воды карстовых источников, режим которых по характеру близок к режиму поверхностных водотоков.

Черноморское побережье Кавказа (ЧПК) относится к южному склону Западного Кавказа. На территории ЧПК выделяются четыре высотных пояса: высокогорный (1500–3300 м абс.), среднегорный (500–1500), предгорный (40–500) и при-

брежный (10–40 м абс). Высокогорный пояс простирается полосой от верховьев р. Туапсе до верховьев р. Мзымты, расширяясь местами до 30 км [12]. Рельеф горной части сформирован интенсивными эрозионно-тектоническими процессами. Здесь развиты глубокие, узкие ущелья, узкие водораздельные хребты, характерная крутизна склонов составляет до 50° – 60° . Встречаются также карстовые формы рельефа (массивы Алек, Воронцовский, Ахун, Ахцу, Дзыхра и Ахштырь, три последних затрагивают среднюю часть бассейна р. Мзымты) [12, 17]. Ближе к побережью располагается зона холмистых предгорий высотой от 30 до 660 м. Это территория развития легко разрушающихся палеогенных некарстующихся отложений, для которой характерны пологие водоразделы, широкие речные долины, густая эрозионная сеть.

В пределах исследуемого района для анализа были также выбраны два бассейна – р. Туапсе до устья и р. Мзымты до начала селитебных районов г. Сочи. Район характеризуется развитием отложений палеозоя, мезозоя и кайнозоя [8]. Горная часть представлена в основном отложениями юрского и мелового возраста. Предгорье и прибрежная часть относятся к палеогеновой, неогеновой и четвертичной системам. В бассейнах рек Туапсе и Мзымты распространены вулканогенно-осадочные, осадочные и терригенно-карбонатные флишевые отложения юры, представленные аргиллитами с прослоями песчаников, алевролитов и горизонтами туфов, а также отложения меловой системы, сложенные глинами и мергелями с про-

Таблица 1. Сводка параметров исследуемых водосборов

Параметр	р. Бельбек	р. Биюк-Карасу	р. Туапсе	р. Мзымта
Площадь F , км ²	492.5	631.0	356.0	896.6
Ср. высота \bar{H}_b , м	416.8	409.2	370	1343
Диапазон высот ΔH_b , м	1420	1185.5	1396	3189
Ср. уклон i_g , м/м	0.181	0.096	0.278	0.462
Ср. уклон i_s , м/м	0.194	0.104	0.292	0.488
Толщина ΔH_e , м	290.9	155.8	438.2	767.0
Объем V_e , км ³	143.5	98.2	156.0	687.6
Толщина ΔH_w , м	104.9	56.4	174.5	336.1
Объем V_w , км ³	51.7	35.5	62.1	301.3
Толщина ΔH_a , м	88.4	43.5	127.2	241.0
Объем V_a , км ³	43.6	27.4	45.3	216.0
Толщина ΔH_c^* , м	408.7	355.0	368	1275
Объем V_c , км ³	122.7	223.9	131.0	1143.1
Коэффициент K_{ea}	0.304	0.279	0.290	0.314
Коэффициент K_{wa}	0.843	0.772	0.729	0.717

* Оценки среднего вреза бассейна ΔH_c и соответствующего объема V_c приведены для замыкающего створа каждого из бассейнов.

слоями известняков, алевролитов и песчаников. Низовья бассейна представлены песками, глинами с прослоями песчаников, алевролитов, мергелей.

Климат ЧПК в горной части континентальный с дождливым летом и холодной снежной зимой, среднегодовая температура +4...+8°C. В прибрежной части климат субтропический, теплый и влажный. Среднегодовая температура здесь +9...+14°C. Снег выпадает редко, большая часть осадков выпадает зимой в виде дождей. Среднегодовое количество осадков в горной части составляет 1400–2400 мм, в прибрежной – от 1200 мм [16]. Реки территории ЧПК имеют неустойчивый режим и смешанное питание за счет дождевых, снеговых и подземных вод, соотношение которых варьирует в зависимости от высоты бассейна, открытости влагонесущим потокам и других факторов.

АНАЛИЗ СТРОЕНИЯ РЕЧНЫХ СИСТЕМ В СВЯЗИ С ПОКАЗАТЕЛЯМИ “ТОЛЩИНЫ” БАСЕЙНОВ

Четыре отобранных речных бассейна обладают некоторыми чертами сходства (табл. 1). Все они относятся к малым бассейнам, их площади меняются в интервале 300–1000 км². Для трех бассейнов характерно преобладание в рельефе средне- и низкогогорий, а в режиме стока – паводков дождевого и смешанного генезиса. В бассейне р. Мзымты есть еще значительная территория

высокогорий, что связано с обособлением в режиме фазы весенне-летнего половодья [16]. Составление бассейнов выполняется для демонстрации возможности выявлять структурно-морфометрические различия в их развитии, обусловленные региональными особенностями геологического строения, путем анализа ЦМР средствами ГИС. Главные особенности – широкое распространение мощных толщ карстующихся пород в центральной части массива Крымских гор и высокая интенсивность процессов тектонического воздымания в южном секторе ЧПК.

В табл. 1 сведены результаты вычислений описанных выше параметров для исследуемых бассейнов. Некоторые особенности их рельефа являются уже на уровне интегрированных параметров. Бассейны рек Бельбек, Биюк-Карасу и Туапсе близки между собой по размеру, средней высоте и диапазону высот. Однако оценки среднего уклона по Туапсе в 1.5–3.0 раза выше, чем у двух крымских бассейнов, такие же соотношения характерны для средневзвешенных оценок “толщины” бассейнов ΔH_e , ΔH_w и ΔH_a . Если рассмотреть отдельно пару бассейнов ЧПК, то параметры уклонов и “толщины” превышают аналогичные показатели для двух крымских бассейнов в 2.5–3.0 раза. Это отражает значительно большую степень вертикальной расчлененности рельефа у бассейнов, формирующихся в условиях интенсивного тектонического воздымания.

Значения коэффициента K_{ea} (доля остаточного рельефа) для всех бассейнов демонстрируют большую устойчивость, что представляет самостоятельный интерес. Однако дать содержательную интерпретацию этому показателю на представленном ограниченном материале вряд ли возможно. Показатель формы склонов K_{wa} фиксирует преобладание выпуклых склонов на территориях всех бассейнов и также сравнительно устойчив, но для пары крымских бассейнов его значения все-таки заметно выше, чем для бассейнов ЧПК. Это отражает широкое распространение в Горном Крыму платообразных форм рельефа на максимальных его отметках, в отличие от ЧПК. Относительно небольшая разница в значениях K_{wa} недостаточно информативна для фиксации указанных различий, что может быть компенсировано более развитыми средствами анализа.

Чтобы подчеркнуть роль карста в формировании речных бассейнов Крыма и их стока, выполнены эксперименты по моделированию (автоматизированному выделению) речных сетей всех четырех экспериментальных объектов. Методика проведения экспериментов кратко освещена выше, а подробно изложена в публикациях [3, 5, 7]. В данном случае эксперимент основан на визуальном сопоставлении рисунка реальной речной сети каждого бассейна с двумя вариантами модельных речных сетей. Первый вариант реализует простейшую, стандартную для многих ГИС процедуру выделения речной сети по ЦМР на основе пороговой площади водосбора. Второй вариант основан на фиксации в качестве признака точки формирования первичного водотока достижения пороговой величины среднего вреза вышележащего водосбора ΔH_c . При этом, если ниже по линии тока средний врез местами становится меньше порогового значения, то водоток все равно строится непрерывно от первой точки формирования до устья с помощью специальной процедуры.

Таким образом, первый вариант моделирования основан на признании главным фактором формирования речной сети объема осадков, собираемых поверхностью водосбора. Индикатором объема собираемых осадков служит площадь водосбора, которая не только применяется для этого непосредственно, но и входит в формулы вычисления практически всех других известных индексов [35]. Альтернативный вариант основан на признании ведущей роли в питании речной сети глубины ее вреза, являющегося индикатором мощности и объема дренируемых водоносных горизонтов. Если полученные варианты моделированных речных сетей наглядно различаются, то визуальное сопоставление их с реальной речной сетью позволит сделать некоторые выводы о роли того или другого фактора в формировании исследуемых речных систем.

Все сравниваемые варианты речных сетей для четырех бассейнов представлены на рис. 3, где различия бассейнов Крыма и ЧПК видны вполне отчетливо. Для двух бассейнов ЧПК оба варианта модельных сетей, откалиброванных на примерно одинаковое с реальной сетью число истоков, дают примерно одинаковый общий рисунок речной сети, достаточно хорошо совпадающий и с реальной сетью. Еще раз подчеркнем, что при сравнении пренебрегаем локальными несовпадениями вариантов по протяженности, местоположению и порядку слияния отдельных водотоков. В целом для бассейнов ЧПК характерно полное и относительно равномерное заполнение речной сетью всей их площади. Вариации плотности сетей друг относительно друга в пределах бассейнов присутствуют, но они слабо различимы визуально. Кроме того, отчетливо видна значительно большая степень развития речной сети в бассейнах ЧПК по сравнению с бассейнами Крыма. Если выше обсуждалась различия параметров вертикального расчленения бассейнов двух регионов — в 1.5–3.0 раза, то аналогичная разница в частоте водотоков достигает 5–10 раз.

Все это подтверждает, что при расположении бассейна на плотных подстилающих породах в условиях интенсивных восходящих тектонических движений в формировании речного стока преобладают поверхностные механизмы, а развитие речной системы определяется эрозионным расчленением поверхности водосбора. При этом речная система и ее бассейн стремятся к состоянию, названному одним из авторов “органичным” [5, 6], и в течение своей эволюции постоянно находятся относительно близко к этому состоянию.

Для обоих бассейнов Крыма варианты автоматического выделения по пороговой площади и по пороговому среднему врезу дают существенно различающиеся рисунки речной сети. В отличие от первого, второй вариант дает рисунок сети, не покрывающей площадь бассейна относительно равномерно, а сосредоточенной в определенном “очаге” формирования, сильно смещенном к верхней части бассейна. В “очаге” речная сеть отличается большими, но неравномерными густотой и разветвленностью, быстро набирает свою максимальную мощность, после чего на дальнейшем протяжении речная система представлена только главным руслом. В верхней части бассейна отмечены значительные участки отсутствия водотоков, а в нижней, за исключением главного русла, водотоков нет совсем.

Сопоставление второго варианта модели речной сети с реальной для рек Бельбек и Биюк-Карасу (рис. 3.2а, 3.3а, 3.2б, 3.3б) показывает их близкое сходство при сильном отличии реальной сети от первого варианта модели по пороговой

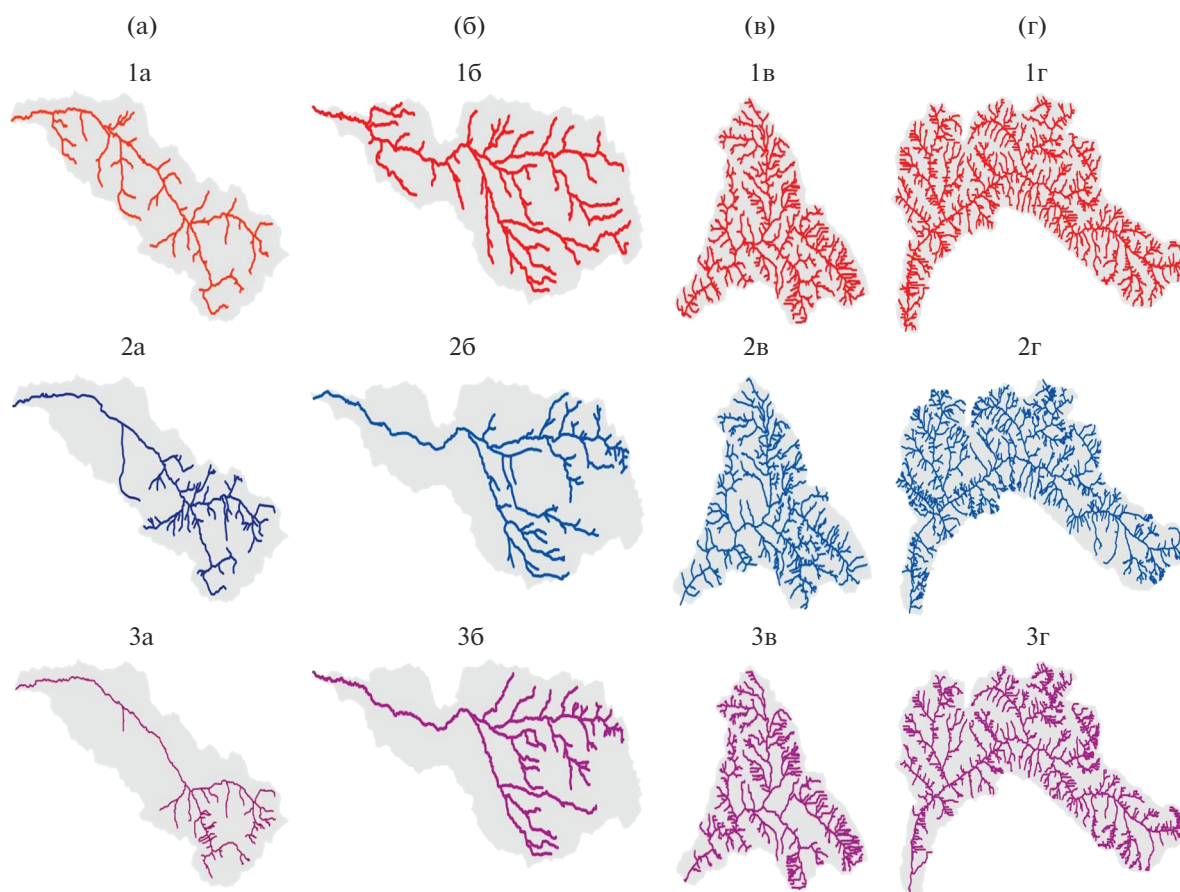


Рис. 3. Сопоставление рисунков речной сети бассейнов рек: а – Бельбек; б – Биук-Карасу; в – Туапсе; г – Мзымта. Варианты речной сети одинаковой мощности (при одинаковом количестве истоков) получены для каждого бассейна различными способами: 1 – стандартное автоматизированное выделение по пороговому значению площади водосбора; 2 – ручная оцифровка речной сети с карты масштаба 1 : 100000; 3 – автоматизированное выделение по пороговому значению глубины вреза водосбора.

площади (рис. 3.1а, 3.2а). Для бассейна р. Бельбек модель речной сети по врезу отличается несколько избыточным смещением “очага” формирования к верхней части бассейна, в реальности он располагается ниже по течению главной реки. Не исключено, что в данном случае рельеф отражает не только современную ситуацию, но и некоторую историю ее развития, т. е. в прошлом карстовые источники, формирующие истоки р. Бельбек, могли располагаться выше их современного положения.

В бассейне р. Биук-Карасу наблюдается очень близкое совпадение “очага” формирования сети на втором варианте модели и в реальности, но внутри него прослеживаются крупные несовпадающие неоднородности густоты сети и крупные перехваты. Это отражает, по-видимому, особенно широкое и мощное развитие карста в верховьях Биук-Карасу, которая уникальна даже в пределах Крыма – эта река не имеет верховьев, начинаясь в ущелье у подножия обширной Кара-

би-яйлы от крупнейшего в регионе источника Карасу-Баши сразу со средним расходом 1.5 м³/с [14].

Описанные различия строения планового рисунка речных систем очевидным образом отражают главную особенность крымских рек, у которых основной сток формируется сложными многоярусными системами подземных потоков в мощных толщах карстующихся пород, а на поверхности водораздельных пространств преобладает не эрозионный, а карстовый рельеф. Для речных систем в таких условиях характерны значительные несовпадения границ и размеров поверхностных и подземных бассейнов, а также слабая связь пространственной организации стокоформирования и дренажа со структурой поверхностных тальвегов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен комплекс характеристик бассейна как объемного тела, который закономерно развивает инструментарий структурно-гидрографиче-

ского анализа речных систем. Предположительно, эти характеристики расширят возможности индикационного подхода к оценке параметров гидрологического режима, суть которого заключается в поиске расчетных региональных зависимостей между отдельными параметрами стока и характеристиками строения и морфологии речных систем. Методы структурной индикации как отдельное направление в гидрологии выделились относительно недавно [13, 25, 28, 35]. Предлагаемые показатели “толщины”, объема, вреза, вертикальной расчлененности бассейна, по-видимому, могут повысить эффективность индикационных методов в активно развивающемся направлении анализа эрозионно-аккумулятивных процессов, стока наносов [26, 32, 36, 38], а в регионах с явным преобладанием подземного питания – и в части оценки параметров стока воды.

С другой стороны, в статье отражены усилия авторов, направленные на развитие алгоритмов обработки и анализа рельефа с использованием общедоступных ЦМР среднего масштаба и инструментария современных ГИС. Поэтому применяемые в статье алгоритмы описаны подробно, с перечислением всех этапов обработки и применяемых инструментов наиболее популярной в настоящее время ГИС ArcMap. Расширение инструментария, повышение детальности и информативности анализа рельефа могут иметь универсальную ценность и самую широкую область приложений в геоморфологии, геологии и других разделах наук о Земле.

Авторы выражают благодарность А.М. Тарбеевой (МГУ) за обсуждение работы и ценные замечания к статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булавко А.Г. Водный баланс речных водосборов. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 304 с.
2. Гайворонская Н.И. Картометрические и морфометрические показатели как основа для выявления природных предпосылок развития экзогенных геоморфологических процессов на территории белгородской области // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 932.
3. Гарцман Б.И. Анализ геоморфологических условий формирования первичных водотоков на основе цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. 2013. № 1. С. 136–147.
4. Гарцман Б.И. Опыт гидрографического и ландшафтного описания речного бассейна на основе ГИС и геоданных // Метеорология и гидрология. 2014. № 6. С. 67–79.
5. Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Тегай Н.Д., Красноперев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природ. ресурсы. 2008. № 2. С. 116–123.
6. Гарцман Б.И., Галанин А.А. Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 27–37.
7. 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.
8. Гидрогеология СССР. Т. IX. Северный Кавказ / Под ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1968. 488 с.
9. Гидрогеология СССР. Т. VIII. Крым / Под ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1970, 364 с.
10. Догановский А.М. Гидрология суши (общий курс). СПб.: РГГМУ, 2012. 524 с.
11. Кинг Л. Морфология Земли. М.: Прогресс, 1967. 559 с.
12. Клименко В.И., Куканов В.М., Прокофьев С.С. Подземные воды Черноморского побережья Кавказа и их охрана. М.: Наука, 1979. 100 с.
13. Коротный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: ИГ СО РАН, 2001. 164 с.
14. Максимович Г.А. Основы карстоведения. Т. I. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское кн. изд-во, 1963. 445 с.
15. Олиферов А.Н., Тимченко З.В. Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 216 с.
16. Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону: Донской изд. дом, 2012. 607 с.
17. Рекомендации по проведению инженерно-геологических изысканий карстовых областей Черноморского побережья СССР / ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1986. 64 с.
18. Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 250 с.
19. Спиридонов А.И. О картах энергии рельефа. М.: Географгиз, 1952. 188 с.
20. Уфимцев Г.Ф. Горы Земли (климатические типы и феномены новейшего орогенеза). М.: Науч. мир, 2007. 352 с.
21. Шарый П.А. Топографический метод вторых производных // Геометрия структур земной поверхности. 1991. Р. 30–60.
22. Якименко Э.П. Морфометрия рельефа и геология. Новосибирск: Наука, 1990. 201 с.
23. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // Physical Rev. A. 1988. V. 38. № 1. P. 364–374. <https://doi.org/10.1103/physrev.38.364>
24. Borselli L., Cassi P., Torri D. Prolegomena to Sediment and flows connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment // Catena. 2008. V. 75. № 3. P. 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
25. Buffington J.M., Montgomery D.R. Geomorphic classification of rivers // Treatise on Geomorphology: Fluvial Geomorphology / Eds J. Shroder, E. Wohl. V. 9. San Diego, C.A.: Acad. Press, 2013. P. 730–767.
26. Carrara A., Cardinali M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui V., Reichenbach P. GIS techniques and statistical models in

- evaluating landslide hazard // *Earth surface processes and landforms*. 1991. № 16 (5). P. 427–45.
27. *Colaioni F., Flammini A., Maritan A., Banavar J.R.* An Analytical and Numerical Study of Optimal Channel Networks // PACS numbers: 64.60.Ht, 64.60.Ak, 92.40.Fb (arXiv:cond-mat/9610004v2 [cond-mat.stat-mech] 9 Oct 1996)
28. *Fryirs K.A., Brierley G.J.* Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape. Wiley-Blackwell, 2013. 368 p.
29. *Gupta V.* Emergence of statistical scaling in floods on Channel networks from complex runoff dynamics // *Chaos Solitons and Fractals*. 2004. V. 19. № 2. P. 357–365.
[https://doi.org/10.1016/S0960-0779\(03\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0960-0779(03)00048-1)
30. *Howard A.D.* Theoretical model of Optimal Drainage Network // *Water Res. Res.* 1990. V. 26. № 9. P. 2107–2117.
<https://doi.org/10.1029/WR026i009p02107>
31. http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_DEM/
32. *Martinez F., Ojeda A., Manríquez H.* Application of fractal theory to describe the morphological complexity of large stream networks in Chile // *Water Resour.* 2022. V. 49. № 2.
33. *Rinaldo A., Maritan A., Colaioni F., Flammini A., Rigon R., Rodriguez-Iturbe I., Banavar J.R.* Thermodynamics of Fractal Networks // *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 76. № 18. P. 3364–3367.
34. *Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I., Rigon R., Ijjasz-Vasquez E., Bras R.L.* Self-Organised Fractal River Networks // *Phys. Rev. Lett.* 1993. V. 70. № 6. P. 822–825.
35. *Rodrigues-Iturbe I., Rinaldo A.* Fractal River Basin. Chance and Self-organization. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 547 p.
36. *Soeters R., Van Westen C.J.* Slope instability recognition, analysis and zonation // *Landslides: investigation and mitigation*. 1996. № 247. P. 129–77.
37. *Warren S.D., Hohmann M.G., Auerswald K., Mitasova H.* An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data // *Catena*. 2004. V. 58. № 3. P. 215–233.
38. *Wheaton J.M., Brasington J., Darby S.E., Sear D.A.* Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets // *Earth surface processes and landforms. British Geomorphol. Res. Group*. 2010. № 35 (2). P. 136–56.