МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ
METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

Научная статья / Scientific paper
УДК: 551.4:571.6
DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.10

Порядковая классификация водоразделов – методические подходы и алгоритмы реализации в среде ГИС

Б. И. Гарцман[1, 3]*, С. В. Харченко[2,4], А. Л. Энтин[1,2], В. Ф. Толкачева[1]
[1]Институт водных проблем РАН, Москва, Россия; [2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; [3]Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия; [4]Институт географии РАН, Москва, Россия
*e-mail: gartsman@inbox.ru

Аннотация. Системное понимание взаимоотношений главных структурных линий рельефа речного бассейна – водотоков и водоразделов – представляет фундаментальный интерес для гидрологии суши и геоморфологии. Результаты обобщения методов выделения и порядковой классификации водоразделов выявляют два подхода к проблеме. Первый предполагает целостность системы главных структурных линий, сети водотоков и водоразделов рассматриваются как одноранговые, взаимоувязанные и топологически подобные. Наиболее известная реализация подхода – метод морфометрического анализа В. П. Философова, использующий «связанную» классификацию водоразделов на основе базовой классификации речной сети Хортона-Стралера. Метод продемонстрировал эффективность как инструмент решения научных и прикладных задач, имеет существенный потенциал методического и технологического развития на базе современных цифровых моделей рельефа (ЦМР) и ГИС. Второй подход основан скорее на интуитивных представлениях геоморфологов о водоразделах как основном каркасе рельефа и о необходимости различать водоразделы по их значимости либо выраженности. В его рамках выделение на карте водораздельной сети в виде древовидного графа по аналогии приводит к попыткам прямо применить к водоразделам схему нисходящей порядковой классификации, которая получается слабо связанной с классификацией водотоков. Развитие этого подхода может быть способом решения специальных задач геоморфологии, но для решения задач гидрологии и междисциплинарных целесообразно развитие «связанной» классификации В. П. Философова. Дополнение её принципом анализа путей добегания дает ряд существенно лучших свойств получаемых сетей водоразделов, с перспективой получения порядковых закономерностей морфометрических характеристик водоразделов, аналогичных «законам Хортона».

Ключевые слова: сеть водоразделов; порядок водотоков и водоразделов; пути добегания; порядковые закономерности; цифровая модель рельефа; Черноморское побережье Кавказа.
Для цитирования: Гарцман Б. И., Харченко С. В., Энтин А. Л., Толкачева В. Ф. Порядковая классификация водоразделов – методические подходы и алгоритмы реализации в среде ГИС // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 1. С.10–26. DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.10.

Ordinal Classification of Watershed Ridgelines – Methodological Approaches and Implementation Algorithms in the GIS Environment

Boris I. Gartsman[1,3]*, Sergey V. Kharchenko[2,4], Andrey L. Entin[1,2], Vasilisa F. Tolkacheva[1]
[1]Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; [2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; [3]Institute of natural and technical systems, Sevastopol, Russia; [4]Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: gartsman@inbox.ru

Abstract. A systematic understanding of the basin's relief main structural lines relationships – streams and watershed ridgelines – is of fundamental interest to terrestrial hydrology and geomorphology. The results of a generalization of

methods for identifying and ordinally classifying ridgelines reveal two approaches to the problem. The first assumes the integrity of the system of main structural lines, stream and ridgeline networks are considered peer-to-peer, interconnected, and topologically similar. The most well-known implementation of this approach is V.P. Filosofov's morphometric analysis method, which uses a "linked" classification of ridgelines based on the Horton-Strahler river network classification system. This method has demonstrated its effectiveness as a tool for solving scientific and applied problems and has significant potential for methodological and technological development based on modern digital elevation models (DEM) and GIS. The second approach is based more on geomorphologists' intuitive understanding of watershed ridgelines as the basic framework of relief and the need to distinguish ridgelines by their significance or prominence. Within this framework, the identification of a ridgeline network on a map as a tree-like graph by analogy leads to attempts to directly apply a descending ordinal classification scheme to watershed ridgelines, which is weakly related to the classification of streams. Developing this approach can be a way to solve specific geomorphological problems, but for hydrological and interdisciplinary problems, the development of V.P. Filosofov's "linked" classification is advisable. Supplementing it with the principle of travel path analysis yields a number of significantly improved properties of the resulting ridgeline networks, with the potential to obtain ordinal patterns of watershed morphometric characteristics similar to "Horton's laws".

Keywords: ridgelines network; stream and ridgeline order; travel paths; ordinal patterns; digital elevation model; Black Sea coast of the Caucasus.

For citation: Gartsman B. I., Kharchenko S. V., Entin A. L., Tolkacheva V. F. Ordinal Classification of Watershed Ridgelines – Methodological Approaches and Implementation Algorithms in the GIS Environment. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 1, pp. 10–26. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.1.10. (In Russian; abstract in English).

Введение

Структурно-гидрографический анализ речных систем, как научное направление, развивается на стыке гидрологии суши и геоморфологии. Фокусом настоящего исследования является попытка системного понимания взаимоотношений основных структурных линий рельефа речного бассейна – водотоков и водоразделов, что представляет фундаментальный интерес для обеих упомянутых дисциплин.

Нисходящая порядковая классификация водотоков, образующих речные системы, в настоящее время может рассматриваться как базовая концепция гидрологии суши. Начиная с основополагающих работ Р. Хортона [1], предложен целый ряд вариантов таких классификаций, которые объединяют два общих положения: первый порядок присваивается первичному водотоку, протяжением от истока до слияния с любым другим водотоком; порядки водотоков нарастают при движении сверху вниз по току воды в системе. Нарастание порядка в разных классификациях происходит по различным правилам, но всегда в соответствии с естественным процессом концентрации речного стока, увеличением масштаба речной системы и выраженности проявлений системообразующих процессов в ней. Эта закономерность многообразно проявляется в виде известных «законов Хортона», т.н. индикационных зависимостей, и в иных формах [1–5].

В геоморфологии одним из основоположников концептуально-оформленного подхода к порядковой классификации как фундаментальному и притом практичному, методическому инструменту, следует считать В. П. Философова [6]. Особенностями геоморфологического виденья проблемы являются, во-первых, рассмотрение вместо сети водотоков сети «долин» (собственно – их тальвегов) [7]. В дальнейшем из соображений удобства будем употреблять термины «водотоки» и «тальвеги» как синонимы, обозначающие одни те же структурные линии рельефа. Во-вторых, изначально рассматриваются именно взаимосвязанные сети тальвегов и водоразделов как равно значимые элементы рельефа, что не характерно для гидрологического подхода.

Появление в течение последних 30 лет общедоступных детальных цифровых моделей рельефа (ЦМР), а также средств их обработки в виде ГИС, создало широкие возможности развития данного научного направления и практического применения его результатов. Очевидной потребностью для реализации этих возможностей является разработка специализированных

инструментов обработки ЦМР. Менее очевидной, но еще более насущной видится необходимость решения ключевых методических проблем, в частности, касающихся автоматического построения и порядковой классификации сетей водотоков и водоразделов по ЦМР средствами ГИС [8–10]. Необходима систематизация имеющихся методик порядковой классификации водоразделов, в особенности тех, которые могут быть реализованы в виде алгоритмов автоматизированной обработки ЦМР. Нами собраны, частично адаптированы, а частично разработаны, ряд таких алгоритмов, которые сопоставлены на примере анализа рельефа трех речных бассейнов Черноморского побережья Кавказа, представляющих широкий диапазон ландшафтных условий. На основе сопоставления сделаны выводы о корректности разных алгоритмов и перспективах разработки инструмента, решающего сформулированную выше задачу.

Материалы и методы исследования

Статья известного математика Артура Кейли, вышедшая в 1859 г. [11], возможно, является наиболее ранней научной публикацией, в которой ставится задача формализованного анализа взаимосвязей тальвеговых и водораздельных линий. В ней рельеф рассматривается строго математически, как поле высот, заданное системой пересекающихся в каждой точке под прямым углом линий одинаковых высот (горизонтали) и максимальных уклонов (линии падения). В таком рельефе присутствуют топологически симметричные точки – узлы локальных положительных и отрицательных экстремумов, а также седловидные узлы. Линии водоразделов и тальвегов наследуют топологическую симметричность, соединяя экстремумы (вершины и впадины, соответственно) и пересекаясь в седловидных узлах. Таким образом, водоразделы и тальвеги предстают в анализе как единая система *вторичных* структурных линий рельефа, в то время как в современной геоморфологии их принято рассматривать как *главные* [12], отражающие ключевые особенности структурной организации поверхности.

Работы географа-математика Кристиана Вернера [13–15] представляют едва ли не единственный пример развития теоретической модели взаимосвязанных сетей водотоков и водоразделов в пределах речного бассейна с их порядковой классификацией. Рассматривается только плановый рисунок сетей как топологическая и геометрическая конструкция, т.е. также формально математически, но с позиций не теории поля, а теории графов. Рассмотрение характеризуется строгой формализацией и взаимным соответствием сетей – количество элементов 1-го порядка и старший порядок у них совпадают (рисунок 1). Строгость модели, составляет несомненное её достоинство, в частности, позволяя выполнять формальное исчисление элементов сетей.

Однако, эти же свойства модели Вернера определяют и основной её недостаток. Поскольку характер физических процессов, формирующих сети водотоков и водоразделов, принципиально различен, то строгая топологическая симметрия присвоения им порядков явно избыточна. Яркое проявление этого – достижение старшего порядка водораздела в единственной точке, топологически симметричной точке замыкающего створа водотока старшего порядка (рисунок 1б). Расположение этой топологически уникальной точки на внешнем водоразделе бассейна относительно случайно, и никакими уникальными физическими свойствами она не обладает. Интуитивно ожидается противопоставление протяженного водотока старшего порядка протяженному же отрезку «главного» водораздела бассейна, имеющему тот же порядок.

Порядковые классификации водотоков показали свою эффективность как инструмент организации и «свертки» информации для индикационного оценивания гидрографических и гидрологических параметров неизученных бассейнов. В то же время, в отношении водоразделов порядковые классификации в гидрологии практически не рассматривались. Интерес представляют возможности подобной классификации водоразделов прикладного характера, ориентированной на автоматизированный анализ реального рельефа по ЦМР. Обзор пригодных методических подходов и разработок целесообразно начать с анализа концепции В. П. Философова.

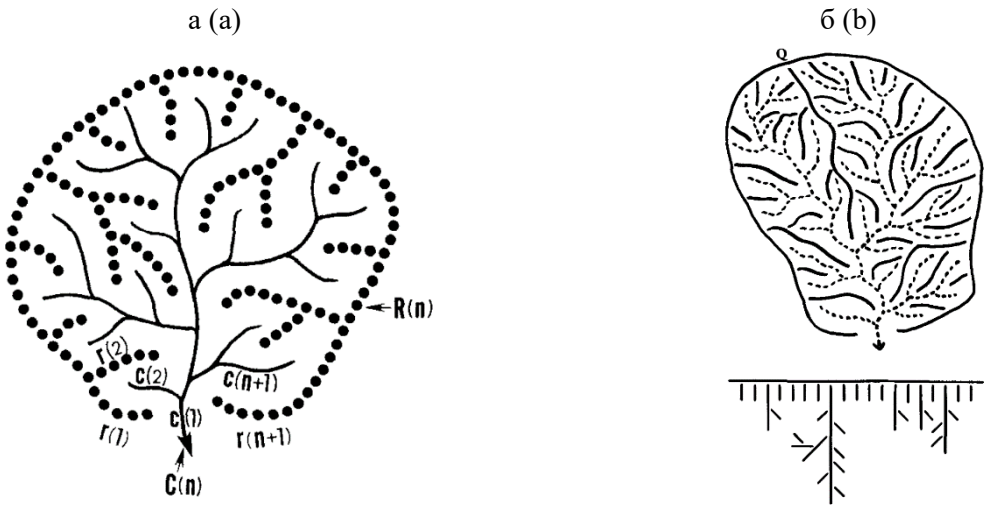


Рисунок 1. Иллюстрации к модели взаимосвязанных сетей водотоков и водоразделов К. Вернера: а – схема взаимосвязанных сетей водоразделов и водотоков бассейна с чередующимися внешними элементами [14]; б – вверху – схема сети водотоков, внешнего водораздела, внутренних водоразделов; внизу – схематизированный граф, отображающий сеть водоразделов, внешнего и внутренних [13]

Figure 1. Illustrations of C. Werner's coupled stream and watershed network model: a – schematic of coupled watershed and stream networks within a basin with alternating external elements [14]; b – top: schematic of a stream network, external watershed, and internal watersheds; bottom: schematic graph representing the network of external and internal watersheds [13]

Морфометрический метод

Морфометрический метод анализа рельефа В. П. Философова [6, 7, 16] включает построение разнопорядковых базисных и вершинных поверхностей путем интерполяции высот тальвегов и водоразделов, классифицированных по порядкам Хортона-Стралера. Далее эти поверхности содержательно анализируются, а также служат для построения специальных карт (карты остаточного рельефа, карты сноса и т.п.). Основанием построений служит гипотеза, что структурные линии и соответствующие им поверхности более высоких порядков отвечают более древним стадиям развития рельефа под влиянием флювиальных и склоновых процессов.

Практика применения метода показывает, что порядковая классификация тальвегов в нем имеет ясное концептуальное основание, а алгоритм её применения и построения на её основе порядковых базисных поверхностей легко реализуется и широко применяется. Напротив, концептуальные основания порядковой классификации водоразделов представляются неясными, и алгоритм её применения в представлениях В. П. Философова существенно эволюционируют и в целом остается двойственным.

В ранних работах [7, 16] предлагается построение на карте водоразделов, разделяющих все тальвеги, фактически – путем экспертного анализа. После этого порядковая классификация сети водоразделов выполняется аналогично сети водотоков, т.е. выделяются первичные неразветвленные участки 1-го порядка, а все высшие порядки формируются при попарном соединении участков предшествующего порядка. Однако логика такой классификации, описанная выше и интуитивно очевидная для сети водотоков, в применении к сетям водоразделов отсутствует. Водораздельные линии не являются результатом сосредоточенного и нарастающего продольного воздействия потока вещества и энергии, напротив – водоразделы формируются рассредоточенными воздействиями, направленными в субпоперечных их простиранию направлениях.

Представляется, что порядковые закономерности для водоразделов (если таковые существуют) формируются вследствие порядковой структуры водотоков и отображают её. Соответственно, порядковые классификации

водоразделов и водотоков должны быть тесно связаны между собой. Основная методическая работа В. П. Философова [6] уже представляет два подхода к классификации водоразделов, один из которых назван «дихотомическим» – он изложен выше. Сам автор отмечает, что его недостатком является независимость назначения порядков тальвегов от порядков водоразделов и их возможное несоответствие, что затрудняет интерпретацию результатов.

В качестве альтернативы описана «связанная» классификация водоразделов, основанная на предположении, что водораздельная линия, оконтуривающая водосбор и замыкающаяся на устье водотока определенного порядка, имеет порядок этого водотока. При этом, поскольку водораздельные линии разнопорядковых сегментов гидрографической сети могут многократно перекрываться, то отдельные их фрагменты могут получать целые наборы порядков – таким фрагментам присваивается старший порядок из набора. Эта методика широко использовалась ранее [17–19], но применяется и поныне [20, 21] для реконструкции положения разнопорядковых вершинных поверхностей.

Именно «связанную» порядковую классификацию водоразделов соотносят обычно с именем Философова, в то время как «дихотомическая» классификация, аналогичная классификации водотоков, считается как бы самоочевидной. Отметим, что основное внимание в морфометрическом методе уделяется построению полипорядковых [6] вершинных (и базисных) поверхностей, где поверхность порядка *N* проходит через водоразделы порядка *N* и всех более высоких порядков. Это сильно сглаживает эффекты методических противоречий в порядковых классификациях. Однако далее В. П. Философов признает и целесообразность построения монобазисных и моновершинных поверхностей (по тальвегам и водоразделам одного порядка) [6, стр. 69], для которых эффекты независимой классификации тальвегов и водоразделов могут стать критическими, а содержательная интерпретация результатов – невозможной.

Анализ водоразделов на основе инвертированного рельефа.

Классификация водоразделов сетей по «дихотомическому» принципу сравнительно широко применяется в наиболее просто реализуемой форме – путем обработки инвертированной ЦМР. Сеть водоразделов строится как сеть водотоков на инвертированном (обращенном) рельефе по стандартной процедуре современных ГИС на основе отбора ячеек сети по пороговому значению показателя, аналогичного водосборной площади [22], с вычислением порядка по системе Хортона-Стралера. При этом параметр построения – пороговая водосборная площадь, – на инвертированной ЦМР аналогична предельной рассеивающей площади на склонах, т.е. вне гидрографической сети [22, 23]. Изменяя величину этого параметра, можно варьировать как валовые характеристики полученной сети водоразделов (суммарную длину, густоту и др.), так и её порядковую структуру.

Кроме того, что любая «дихотомическая» классификация водоразделов не обеспечивает «связанность» с классификацией водотоков, данный вариант построения обладает еще и специфическим недостатком. Поскольку инструменты ГИС для построения речной сети разработаны именно для анализа флювиального рельефа, а рельеф инвертированной ЦМР таковым не является, то корректность работы всей процедуры не обеспечена. Наиболее очевидные её нарушения связаны с массой замкнутых «понижений рельефа» (на деле являющихся одиночными вершинами), которые существуют и на реальных ЦМР, для чего имеется специальный инструмент их заполнения – получения т.н. гидрологически-корректной ЦМР. Для реального флювиального рельефа это связано лишь с незначительной коррекцией, практически не влияющей на локализацию водотоков. Для инвертированного же рельефа объем и площадь заполненных «понижений» велики, что сказывается на локализации и высотных характеристиках полученной сети водоразделов.

Анализ водоразделов на основе показателя Bmax

Большой интерес представляет оригинальная методика выделения и

классификации водоразделов по ЦМР, предложенная Линдси и Сейбертом в 2013 году [24]. Она похожа на предыдущую в смысле отсутствия «связанности» порядков водотоков и водоразделов, но не имеет важных её недостатков. Водоразделы выделяются на основе морфометрической величины (параметра) *Bmax*, которая равна максимальному расстоянию по линиям тока между каждой ячейкой ЦМР и каждой из 8 ячеек её ближайшего окружения. То есть, из данной ячейки и каждой из 8 соседних вычисляется суммарная длина пары линий тока до точки их слияния, затем из 8 значений суммарной длины выбирается максимальное значение (*Bmax*), которое приписывается данной ячейке. Если все соседи данной ячейки расположены в пределах одного склона, то *Bmax* будет невелико. Но если данную ячейку и хотя бы одну соседнюю разделяет значимый водораздел, значение *Bmax* будет высоким.

Bmax используется как континуальный морфометрический параметр, представляющий меру «водораздельности» в каждой ячейке ЦМР. Переход от значений *Bmax* к дискретным порядкам водораздельных линий авторами методики не рассматривался. Нами для этого подбиралось пороговое значение *Bmax*, на основании которого выделялась растровая водораздельная сеть, аналогично тому, как речная сеть выделяется на основании порогового значения площади водосбора. Полученная таким образом древовидная сеть классифицировалась по порядкам Хортона-Стралера. Подчеркнем, что эта дополнительная обработка применялась нами для получения результата, пригодного для сравнения с результатами других методик. Методика, основанная на *Bmax*, выгодно отличается наличием ясного физического принципа для определения значимости водоразделов. Однако применение к полученной сети водоразделов «дихотомической» схемы классификации приводит опять к противоречию – фрагменты водоразделов с высоким порядком могут иметь невысокие значения *Bmax* и наоборот.

Классификация водоразделов на основе путей добегания

Существенным недостатком алгоритма «связанной» классификации Философова является переход водоразделов всех порядков на оконечностях хребтов от линий гребней к линиям ребер, спускающихся в долины и пересекающих линии тальвегов [18]. Соответственно, вершинные поверхности проходят через точки замыкающих створов разнопорядковых водотоков, пересекаясь в них с базисными поверхностями. Рациональным представляется прохождение водораздельных линий по междуречным поверхностям, без спуска в долины и пересечения их. Методики с использованием инвертированной ЦМР и параметра *Bmax* свободны от этого противоречия – сети водоразделов и водотоков не пересекаются и не касаются друг друга в силу самих способов их построения.

Таким образом, проблему можно сформулировать в виде вопроса: «Возможно ли построить систему водоразделов в рамках представлений о целостной системе структурных линий рельефа речного бассейна и выполнить порядковую классификацию водоразделов на основе физических принципов при соблюдении однозначной её связи с порядковой классификацией водотоков?». Фактически речь может идти о развитии «связанной» классификации водоразделов В. П. Философова с дополнением её концепции физически-обоснованным принципом.

Положительный ответ на этот вопрос дан в работах [8, 9], где, как представляется, предложен адекватный алгоритм. Как и для «связанной» классификации В. П. Философова, в основе рассмотрения находится водоток порядка *N* речной сети, который имеет бассейн порядка *N*, ограниченный внешней водораздельной линией до замыкающего створа. Однако не всей этой водораздельной линии присваивается порядок *N*, а лишь той ее части, которая связана с замыкающим створом путями добегания порядка *N*. Путь добегания – линия тока условной капли дождя, построенная от точки выпадения на водосборе до замыкающего створа и выраженная через последовательность порядков водотоков, слагающих эту линию.

Путь добегания порядка *N* содержит непрерывную последовательность участков *x0* → *x1* → *x2*.... → *xN-1* → *xN*, где *x0* – участок

движения по склону, *xi* – участок движения по водотоку порядка *i*. Вообще, на водосборе порядка *N* любой путь добегания будет начинаться с *x0* и заканчиваться *xN*, однако порядок *N* будут иметь лишь те пути, в которых последовательность всех порядков непрерывна. И только те участки водораздельной линии бассейна порядка *N*, от которых начинаются пути добегания порядка *N*, образуют водораздел порядка *N*. Такое правило классификации водоразделов является «жестким», в качестве альтернативы которому сформулировано более «мягкое». Для выделения участков водораздела порядка *N* вместо только путей добегания порядка *N* могут быть использованы все пути с наличием «триплета» порядка *N*, то есть оканчивающихся последовательностью ..... → *xN-2* → *xN-1* → *xN*. В случае, если ни одного «триплета» (последовательности трех подряд порядков) в общем пути добегания нет, то его порядок будет равен 1 или отсутствовать – в зависимости от последовательности начальных звеньев.

Основания и особенности применения двух описанных правил подробнее обсуждаются в [8]. В обоих случаях в результате формируется сеть разнопорядковых водоразделов, старший порядок которой равен старшему порядку сети водотоков. Предлагаемая схема является развитием «связанной» классификации Философова, дополняя её физически-обоснованным принципом путей добегания, сходным с тем, на котором основан расчет показателя *Bmax*.

Выделение и классификация водоразделов выполняется авторским программным инструментом Ridgelines Network Orders[1], разработанном для среды ArcGIS Desktop [9]. Результатом его работы является набор пространственных данных линейной геометрии, в котором представлена сеть водоразделов водосборов всех порядков в пределах обрабатываемого бассейна. Сеть состоит из сегментов линий, через каждый из которых проходят водоразделы многих вложенных и соседствующих водосборов, и для каждого сегмента записывается последовательность порядков всех проходящих через него водоразделов. Путем переклассификации этой последовательности для каждого сегмента, соответственно описанным выше схемам, получаем итоговые порядки – по «связанной» классификации В. П. Философова *Nf*, по полному пути добегания *Np* и по «триплету» старшего порядка *Nt* (таблица 1).

Описанные выше алгоритмы анализа водоразделов, основанные на обработке инвертированной ЦМР и на расчете показателя Bmax, реализованы в среде ГИС Whitebox Tools. Подбор калибруемых параметров в обоих алгоритмах выполнен таким образом, чтобы полученные сети имели одинаковый старший порядок, совпадающий со старшим порядком речной сети каждого бассейна. В итоге создан инструментарий получения на каждый бассейн пяти вариантов сетей водоразделов, классифицированных по порядкам, что позволяют сравнивать результаты применения различных алгоритмов.

В качестве тестовых объектов апробации описанных подходов выбраны бассейны трех рек, гидрологические и морфологические характеристики которых являются типовыми для южного склона Западного и Северо-Западного Кавказа – Туапсе, Шахе и Мзымты. Бассейны расположены на 150-километровом отрезке южного макросклона Большого Кавказа и имеют площади, соответственно, 352, 553 и 885 км^2. Рельеф всех трех бассейнов низко- и среднегорный, максимальные отметки главных водоразделов каждого бассейна нарастают с севера на юг, для Туапсе – 1410 м, Шахе – 2530 м, Мзымты – 3210 м. Геологическое строение сходное, с поверхности залегают флишевые толщи (от средней юры до верхнего мела), с чередованием известняков, песчаников, мергелей, встречаются глинистые сланцы, аргиллиты. В связи с высокими показателями годового количества осадков (1000–3000 мм), высокой степенью выветренности осадочных толщ с поверхности, значительными уклонами и

[1] ArcPyStreamScape – A set of ArcGIS Desktop scripts for river system structure analysis. https://github.com/aentin/ArcPyStreamScape

общей энергией рельефа – рельеф рассматриваемых бассейнов моделируется мощными эрозионно-денудационными (в первую очередь, флювиальными и склоновыми) процессами.

Таблица 1. Переклассификация последовательности порядков сегментов водоразделов в целевое значение (для сети 5-го порядка)

Table 1. Reclassification of watershed segment order sequences into target values (for a 5th-order network)

Последовательность порядков пути добегания для фрагмента сети водоразделов	Порядок после переклассификации по правилу		
	«связанной» классификации Философова N_f	полного пути добегания N_p	«триплета» старшего порядка N_t
54321	5	5	5
54320*	5	-	5
54301	5	1	5
54300	5	-	5
54021	5	2	2
54020	5	-	-
54001	5	1	1
54000	5	-	-
50321	5	3	3
50320	5	-	-
50301	5	1	1
50300	5	-	-
50021	5	2	2
50020	5	-	-
50001	5	1	1
50000	5	-	-
04321	4	4	4
04320	4	-	4
04301	4	1	1
04300	4	-	-
04021	4	2	2
04020	4	-	-
04001	4	1	1
04000	4	-	-
00321	3	3	3
00320	3	-	-
00301	3	1	1
00300	3	-	-
00021	2	2	2
00020	2	-	-
00001	1	1	1

*– «0» обозначает отсутствие участка данного порядка в последовательности порядков пути добегания

Определение положений водоразделов выполнено на основе фрагментов ЦМР FABDEM. Эта ЦМР создана на основе покрытия Copernicus GLO-30, полученного путём радиолокационной интерферометрии; для этого покрытия была проведена корректировка смещений высот, обусловленных растительным покровом, зданиями и сооружениями [25]. Пространственное разрешение FABDEM составляет 1″, для вычислений было произведено перепроецирование фрагментов в систему координат UTM (зона 37) на основе датума WGS84 и обрезка полученных растров по контурам водосборных бассейнов соответствующих рек. Размер ячейки полученных растров составил 23 м.

Результаты и обсуждения

На рисунке 2 приводится пример сопоставления трех вариантов «связанной» классификации водоразделов, соответствующих описанным в таблице 1 схемам, и двух вариантов «дихотомической» классификации – с использованием инвертированной ЦМР и показателя *Bmax*. Концептуальные различия двух анализируемых подходов выражаются в очевидной разнице общей формы получаемых водораздельных сетей.

Детальное сравнение трех вариантов «связанной» классификации водоразделов выполнено расчетом суммарной длины совпадений/несовпадений порядков сегментов водоразделов по разным вариантам (таблица 2). При этом фрагментам водоразделов с любым порядком по одному из сравниваемых вариантов, а по второму не классифицированных, назначался порядок 0 по второй классификации. Водораздельные линии, не имеющие порядка в обеих сравниваемых вариантах, не учитываются.

Анализ рисунка 2 и таблицы 2 позволяет на примере бассейна р. Шахе выявить закономерности соотношений «связанных» вариантов классификации. На рисунке 2а наглядно виден отмеченный выше недостаток классификации В. П. Философова. Водораздел старшего порядка проходит по границе бассейна старшего порядка в виде замкнутой линии, объединяя разнородные по морфометрии и положению в рельефе участки, которые рационально было бы отнести к различным порядкам. Также этот водораздел пересекает долину водотока старшего порядка и сам этот водоток в замыкающем створе. То же присуще водоразделам меньших порядков, с поправкой на их фрагментированность. Водораздельная сеть на рисунке 2а состоит из многочисленных циклических ветвей, принципиально отличаясь от древовидной сети водотоков, причем сети пересекаются во всех замыкающих створах водотоков всех порядков.

Таблица 2. Соответствие порядков водоразделов в различных классификациях по протяженности (км), бассейн р. Шахе

Table 2. Correspondence of watershed orders across different classifications by length (km), Shakhe River basin

Порядки водоразделов		**По В. П. Философову**					**По старшему «триплету»**				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
По полному пути	0		136	36,0	4,58	1,89				0,18	0,62
	1	932		24,7	9,78	18,5	984				1,15
	2		236		5,22	40,8		282			
	3			70,9		59,5			130		
	4				34,3					34,3	
	5					73,2					73,2
По старшему «триплету»	0		136	36,0	4,39	1,26					
	1	932		24,7	9,78	17,4					
	2		236		5,22	40,8					
	3			70,9		59,5					
	4				34,5						
	5					75,0					

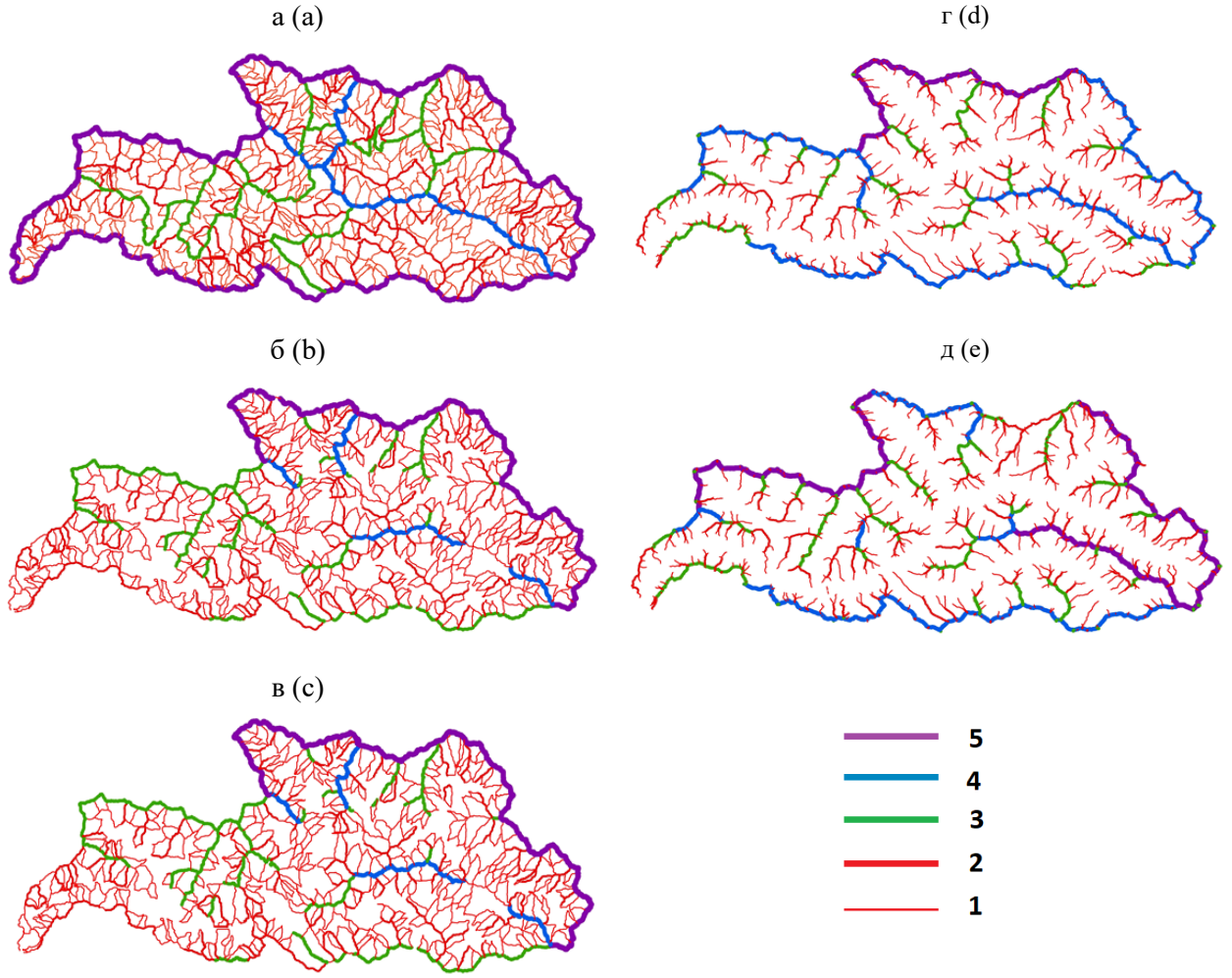


Рисунок 2. Результаты автоматического выделения сети водоразделов бассейна р.Шахе (*N*=5) в пяти вариантах порядковой классификации: а – по В.П.Философову; б – по полному пути добегания; в – по старшему «триплету»; г – по инвертированному рельефу; д – по показателю B_{max}. Цвета соответствуют порядкам с 1-го по 5-й

Figure 2. Results of automated watershed network delineation for the Shakhe River basin (*N*=5) across five ordinal classification variants: a – according to V.P. Filosofov; b – by total flow travel time; c – by the highest "triplet"; d – by inverted relief; e – by the Bmax index. Colors correspond to orders 1 through 5

Сети водоразделов на рисунках 2б,в выглядят гораздо рациональнее. Они демонстрируют постепенный рост порядков водоразделов по мере их удаления от замыкающего створа, с достижением старшего порядка вблизи интуитивно определяемого «главного» водораздела, окаймляющего верховья водотока старшего порядка. Водоразделы низших порядков расположены аналогично. Сети водоразделов демонстрируют общую топологическую симметрию по отношению к сетям водотоков, подобную представленной на рисунке 1. При этом водоразделы всех порядков, кроме 1-го, не замкнуты и не пересекают долины и водотоки.

Из таблицы 2 видно, во-первых, что сеть по классификации В.П. Философова превышает два других варианта по протяженности на 10,6 и 10,7 % (при всех сравнениях большая протяженность берется за 100 %). Это обусловлено алгоритмом этой классификации, учитывающим все водораздельные линии целиком, без исключений. Во-вторых, в соответствии с тем же алгоритмом (см. таблицу 1), порядок любого сегмента водораздела *Nf* может быть только равен или больше, чем *Np* и *Nt*. Явно преобладают сочетания *Nf* = *Np* и *Nf* =*Nt* – 80,0 % и 80,1 % протяженности сети, соответственно. Третьей

интересной особенностью таблицы 2 является полное отсутствие сочетаний порядков $Nf = Np+1$ и $Nf = Nt+1$, что отражено и в таблице 1 – видно, что порядок по полному пути или старшему «триплету» не может быть на единицу меньше, чем порядок по В. П. Философову.

Сопоставление классификаций по полному пути и по старшему «триплету» (см. таблицу 2) показывает их почти полное совпадение. Сеть по старшему «триплету» несущественно длиннее, поскольку в ней лишь три сегмента с $Np=0$ приобретают высокие значения Nt. Вообще Nt всегда либо равен, либо больше Np, при этом доля протяженности сегментов с $Nt=Np$, составляет практически 100 %. Различия вариантов связаны с формированием «молодых» низкопорядковых эрозионных врезов вблизи основных водоразделов, что местами нарушает полные пути добегания. Для рассматриваемых бассейнов это редкое явление, но для других условий оно может быть распространенным, а соответствующие различия в сетях – существенными [8].

В таблице 3 даны сводные данные по сопоставлению всех вариантов классификации для всех трех исследуемых бассейнов. Следует отметить, что варианты «связанной» и «дихотомической» классификаций (см. рисунок 2) получены в разных программных средствах ГИС с помощью разного инструментария. Сети вариантов «связанной» классификации строятся на едином полилинейном слое, различаясь лишь классификационными индексами в таблице атрибутов, что позволяет выполнять их строгое и точное сопоставление. Напротив, две сети вариантов «дихотомической» классификации строились независимо и существенно отличаются по локализации и топологии как друг от друга, так и от сетей «связанной» классификации в целом. Пространственное сравнение таких сложных объектов представляет собой нерешенную пока задачу. Поэтому для сопоставления с участием вариантов сетей «дихотомической» классификации была разработана процедура обработки растровых представлений сетей, дающая лишь приблизительные результаты, позволяющие оценить линейные меры совпадения сетей с точностью, по оценке, примерно 5 %. Они приводятся в скобках и с пониженной точностью.

Данные таблицы 3 показывают, что особенности соотношений «связанных» вариантов классификации, описанные выше на примере бассейна Шахе, полностью сохраняются и для остальных исследуемых водосборов. Главные из них – высокая степень совпадения (~80 %) классификации Философова с вариантами по полному пути и по старшему «триплету», и почти 100 % совпадение двух последних вариантов. Учитывая эту вторую особенность, в дальнейшем анализе будем рассматривать только вариант классификации по старшему «триплету».

Напротив, все соотношения между вариантами водораздельных сетей «связанных» классификаций и вариантами «дихотомических» классификаций показывают очень низкий уровень их совпадения – в интервале 20–30 %. Очевидно, такая низкая степень сходства указывает на отображение всеми вариантами самых общих закономерностей строения рельефа, но расхождения между двумя группами вариантов водораздельных сетей явно преобладают. Это же подтверждается и графическими представлениями сетей на примере бассейна р. Шахе (см. рисунок 2). Напротив, между вариантами сетей по инвертированному рельефу и по показателю Bmax наблюдается высокий уровень совпадения – на уровне 70 %. Таким образом, классификация сети водоразделов, основанная на её связи с речной сетью, и независимая от речной сети классификация водоразделов, представляют собой принципиально различные подходы, направленные на решение разных задач и дающие очень слабо сопоставимые результаты.

Как упоминалось, в результате порядковой классификации водоразделов ожидается возможность выявления порядковых закономерностей значений их морфометрических характеристик, аналогичных порядковым закономерностям характеристик водотоков. Поскольку вопрос к настоящему моменту концептуально не разработан, в данной работе возможно только продемонстрировать некоторые перспективы данного направления исследований.

Очевидным первым шагом может стать обобщение высотных характеристик водоразделов, поскольку это основная и наиболее доступная для массовой обработки характеристика рельефа.

Таблица 3. Соотношение различных вариантов выделения и классификации водоразделов по протяженности сети водоразделов

Table 3. Correlation of different watershed delineation and classification variants by network length

Параметр	**Бассейн Туапсе**		**Бассейн Шахе**		**Бассейн Мзымта**	
Суммарная протяженность сети водоразделов по классификации:	**км**	**%**	**км**	**%**	**км**	**%**
«связанная» В. П. Философова	692,8	100	1389	100	2160	100
по полному пути	622,8	89,9	1241	89,3	1893	87,6
по старшему триплету	622,8	89,9	1241	89,4	1896	87,8
по инвертированному рельефу	489	71	642	46	1010	47
по показателю B_{max}	501	72	670	48	1070	50
Суммарная протяженность сети водоразделов совпадающих порядков по классификациям (сеть 1 / сеть 2):	км	%	км	%	км	%
В. П.Философова/полного пути	551,6	79,6	1111	80,0	1707	79,0
В. П.Философова /старшего триплета	554,4	80,0	1113	80,1	1712	79,3
Полного пути/старшего триплета	620,0	99,6	1240	99,9	1892	99,8
В. П.Философова /инверт. рельеф	(186)*	(27)	(273)	(20)	(422)	(20)
В. П.Философова / B_{max}	(196)	(28)	(311)	(22)	(389)	(18)
Полный путь/инверт. рельеф	(191)	(31)	(276)	(22)	(420)	(22)
Полный путь / B_{max}	(174)	(28)	(292)	(24)	(382)	(20)
Старший триплет /инверт. рельеф	(192)	(31)	(278)	(22)	(420)	(22)
Старший триплет/ B_{max}	(176)	(28)	(291)	(24)	(382)	(20)
Инвертированный рельеф / B_{max}	(382)	(76)	(441)	(66)	(750)	(70)

* – данные пониженной точности. Сети водоразделов связанных и дихотомических сетей не полностью идентичны геометрически. При сравнении любой связанной и дихотомической или двух дихотомических между собой – длины водораздельных линий не одинаковы. В скобках в таблице показаны длины фрагментов сети 1, имеющие в пределах буфера ±100 м однопорядковые фрагменты водоразделов сети 2. Зеркальная процедура (сравнение сети 2 с сетью 1) – не полностью идентична, отклонение расчетных показателей в среднем составляет 4–5 % от длины сети 1.

Рисунок 3 демонстрирует закономерности изменения статистических параметров высот водоразделов разного порядка для трех исследуемых бассейнов по вариантам классификации: по В. П. Философову, по старшему «триплету», по инвертированному рельефу и по *Bmax*. Для каждого бассейна по каждому варианту классификации вычислялись минимальные и средние значения, а также среднеквадратические отклонения, высоты водоразделов каждого порядка. Способность таких закономерностей зафиксировать отчетливые морфометрические различия между порядками водоразделов обусловлено монотонным характером и большим диапазоном изменения минимальной и средней высоты по порядкам, а также низкими величинами среднеквадратического отклонения высот по порядкам.

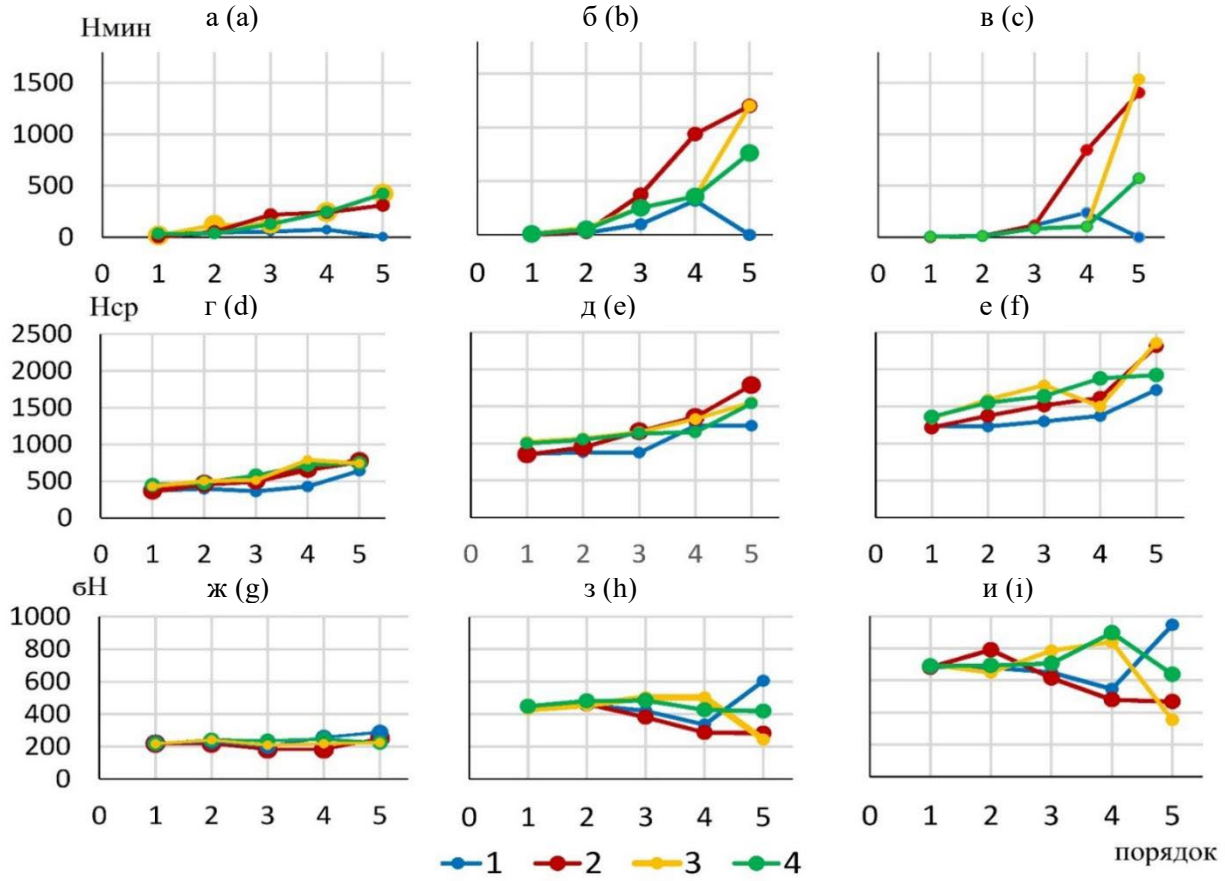


Рисунок 3. Порядковые закономерности для высотных характеристик водоразделов, минимального и среднего значения, а также среднеквадратического отклонения, соответственно, для бассейнов: а, г, ж – р. Туапсе; б, д, з – р. Шахе; в, е, и – реки Мзымта. Для каждого бассейна построение и классификация сети водоразделов выполнялось по методам: 1 – В. П. Философова; 2 – по старшему «триплету»; 3 – по инвертированному рельефу; 4 – по *Bmax*

Figure 3. Ordinal patterns for watershed elevation characteristics (minimum, average, and standard deviation, respectively) for the following basins: a, d, g – Tuapse River; b, e, h – Shakhe River; c, f, i – Mzymta River. For each basin, the construction and classification of the watershed network were performed using the following methods (see legend): 1 – V. P. Filosofov; 2 – highest "triplet"; 3 – inverted relief; 4 – *Bmax* index

Из рисунка 3 видим, что авторская классификация по «триплетам» старшего порядка дает в этом смысле наилучшие результаты. Зависимости минимальных и средних высот водоразделов от порядка для нее всегда монотонны и имеют чаще всего максимальный диапазон. Значения среднеквадратических отклонений высоты по порядкам для данного варианта чаще всего наименьшие. Классификация по *Bmax* также демонстрирует монотонность и значительные диапазоны зависимостей. Зависимости для классификаций по В. П. Философову и инвертированному рельефу часто не монотонны и их диапазоны меньше. Подчеркнем, что эти данные подтверждают лишь принципиальную возможность обобщения морфометрических характеристик водоразделов в виде порядковых закономерностей, а также показывают, что применение классификаций, лучше обоснованных физически, дает лучшие свойства этих закономерностей.

Выводы

Приведенные выше результаты анализа методов выделения и порядковой классификации водоразделов показывают, что существует два подхода к проблеме. Первый основан на представлении о целостной системе структурных линий рельефа, в рамках которой сети водотоков (тальвегов) и водоразделов рассматриваются как

одноранговые, тесно взаимосвязанные и топологически подобные. Наиболее известной разработкой в этом направлении является метод морфометрического анализа В. П. Философова, включающий «связанную» классификацию водоразделов на основе базовой классификации речной сети Хортона-Стралера. Метод не только продемонстрировал значительную эффективность как инструмент решения задач геологии и геоморфологии, но и имеет существенный потенциал методического и технологического развития на базе современных ЦМР и ГИС.

Второй подход не имеет столь же развитого теоретического обоснования, как первый, и основан скорее на интуитивных представлениях геоморфологов о водоразделах как основном каркасе рельефа [26], и о необходимости различать водоразделы по их значимости либо выраженности. В его рамках выделение на карте водораздельной сети в виде древовидного графа естественно приводит к аналогии с речной сетью и к попыткам прямо применить к водоразделам схему нисходящей порядковой классификации. При этом полученная порядковая классификация водоразделов будет слабо связана, либо совсем не связана, с порядковой классификацией водотоков того же бассейна.

Важнейшим, упомянутым выше, недостатком второго подхода представляется неосновательный перенос концептуальной основы порядковой классификации с водотоков на водоразделы. Сходство плановых форм ветвящихся сетей не должно затушевывать принципиальное различие физических процессов, формирующих водотоки и водоразделы. В крайнем своем виде указанное противоречие проявляется для часто используемого приема построения водораздельных сетей путем построения речной сети инструментами ГИС на обращенном рельефе (инвертированной ЦМР). Разобранные выше недостатки этого приема ставят под сомнение целесообразность его использования в качестве метода геоморфологического исследования.

Более убедительно выглядит методика выделения водоразделов на основе континуального показателя значимости Bmax, имеющего ясный физический смысл и корректный алгоритм определения. Однако его применение для выделения сетей водоразделов не требует затем применения «дихотомической» порядковой классификации – в случае необходимости переход к дискретным порядкам водоразделов можно осуществить разного рода интервальными обобщениями и т.п. Можно заключить, что развитие классификаций водоразделов независимо от водотоков может быть способом решения специальных задач геоморфологии, но применение в них дискретных порядков требует самостоятельного обоснования.

Для решения задач гидрологии и междисциплинарных перспективна разработка единой порядковой классификации главных структурных линий рельефа бассейна, в рамках которой классификация водоразделов должна быть «отражением» классификации водотоков, т.е. быть «связанной», по терминологии В.П. Философова. Дополнение классификации Философова принципом анализа путей добегания дает ряд существенно лучших свойств получаемых сетей водоразделов: более рациональный общий вид и размещение в пределах бассейнов; решение проблемы пересечения линиями водоразделов высоких порядков речных долин и водотоков; существенно лучшие классифицирующие свойства порядков с перспективой получения порядковых закономерностей морфометрических характеристик водоразделов, аналогичных «законам Хортона».

Преимущества предлагаемого метода существенно расширяют возможности морфологического анализа рельефа на концептуальной основе, предложенной В. П. Философовым. Они также открывают значительные перспективы в развитии классификации речных систем, методов индикационного оценивания гидрологических характеристик, решении задачи параметризации современных пространственно-распределенных моделей стока.

Благодарности

Методический обзор и разработка инструментов автоматизированной обработки ЦМР выполнены в рамках темы № FMWZ-2025-

0001 Государственного задания ИВП РАН (№ госрегистрации 125031403712-5). Обработка и анализ рельефа трех тестовых бассейнов выполнены в рамках темы Государственного задания Института природно-технических систем (№ госрегистрации 124013000609-2). Геоморфологическая интерпретация результатов выполнялась в рамках темы Государственного задания кафедры геоморфологии и палеогеографии МГУ имени М. В. Ломоносова (№ I.2).

Acknowledgements

The methodological review and the development of automated DEM processing tools were conducted within the framework of Research Topic No. FMWZ-2025-0001 under the State Assignment of the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences (State Registration No. 125031403712-5). The processing and relief analysis of the three test basins were carried out as part of the State Assignment of the Institute of Natural and Technical Systems (State Registration No. 124013000609-2). The geomorphological interpretation of the results was realized within the framework of the State Assignment of the Department of Geomorphology and Paleogeography of the Lomonosov Moscow State University (No. I.2).

Литература / References

1. Хортон Р. Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов [Текст]: Гидрофиз. подход количеств. морфологии. Москва: Гос. изд-во иностр. лит., 1948. 159 с.
2. Гарцман И. Н. Топология речных систем и гидрографические индикационные исследования // Вод. ресурсы, 1973. №3. С 109–124.
3. Карасев М. С., Худяков Г. И. Речные системы (на примере Дальнего Востока). М.: Наука, 1984. 143 с.
4. Корытный Л. М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Ин-т геогр. СО РАН, 2001. 163 с.
5. Rodriguez-Iturbe I., Rinaldo A. Fractal river basins: chance and self-organization. Cambridge University Press, 1997. 547 p.
6. Философов В. П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. 232 с.
7. Философов В. П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1960. 94 с.
8. 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.
9. Гарцман Б. И., Энтин А. Л., Шекман Е. А. Специальные инструменты структурно-гидрографического анализа речных систем в среде ArcMap // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 3. С. 244-261.
10. Guilbert E., Lessard F., Perreault N., Jutras S. Surface network and drainage network: towards a common data structure. Journal of Spatial Information Science, 2023, vol. 26, pp. 53–77. DOI:10.5311/JOSIS.2023.26.240.
11. Cayley A. On contour and slope lines. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1859, s. 4, vol. 18 (120), pp. 264–268. DOI:10.1080/14786445908642760.
12. Ласточкин А. Н. Общая теория геосистем. СПб.: Лема, 2011. 980 с.
13. Werner C. Explorations into the formal-structure of drainage basin. Earth Surface Processes and Landforms, 1994, vol. 19, iss. 8, pp. 747–762. DOI:10.1029/wr018i004p00997.

14. Werner C. Formal analysis of ridge and channel patterns in maturely eroded terrain. Annals of the Association of American Geomorphology, 1988, vol. 78, iss. 2, pp. 253–270. DOI:10.1111/j.1467-8306.1988.tb00206.x.

15. Werner C. Several duality theorems for interlocking ridge and channel networks. Water Res. Res., 1991, vol. 27, iss. 12, pp. 3237–3247. DOI:10.1029/91WR02322.

16. Философов В. П. Карты изобазит и остаточного рельефа. В кн.: Применение геоморфологических методов в структурно-геологических исследованиях. М.: «Недра», 1970. С. 43–52.

17. Морфометрический метод при геологических исследованиях / Под ред. Корженевского А. А., Философова В. П. Материалы первого межведомственного совещания по морфометрическому методу поисков тектонических структур, состоявшегося в Саратове с 1 по 4 февраля 1961 г. Саратов: Изд-во Сар. ун-та, 1963. 264 с.

18. Симонов Ю. Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 250 с.

19. Якименко Э. Л. Карты вершинной и базисной поверхностей Сибири и Дальнего Востока. Геоморфология. 1984. № 3. С. 95–100.

20. Копылов И. С. Морфонеотектоническая система оценки геодинамической активности. Пермь: ПГНИУ, 2019. 130 с.

21. Симонов Д. А., Захаров В. С., Гильманова Г. З., Диденко А. Н. Новейшие вертикальные движения Южного Сихотэ-Алиня и характеристики самоподобия гидросети региона. Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № (3). С. 25–36.

22. McKenzie N. J., Ryan P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. Geoderma, 1999, vol. 89, iss. 1–2, pp. 67–94. DOI:10.1016/s0016-7061(98)00137-2.

23. Флоринский И. В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа // Дис. … д.т.н. Пущино: ИМПБ РАН, 2010. 267 с.

24. Lindsay J., Seibert J. Measuring the significance of a divide to local drainage patterns. International Journal of Geographical Information Science, 2013, vol. 27. DOI:10.1080/13658816.2012.705289.

25. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. Environmental Research Letters, 2022, vol. 17, iss. 2, p. 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.

26. Гаврилов А. А. Некоторые особенности соотношений орографических элементов и гидросети // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2020. № 6. С. 99–109.

Поступила в редакцию / Received 22.02.2026
Принята к публикации / Accepted 19.05.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарцман Борис Ильич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия, Институт инженерно-технических систем, г. Севастополь, Россия; SPIN-код: 7792-9120, ORCID: 0000-0002-5876-7015; e-mail: gartsman@inbox.ru.

Харченко Сергей Владимирович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, МГУ имени М. В. Ломоносова; старший научный сотрудник, Институт географии РАН, Москва, Россия; ORCID: 0000-0002-2823-5747, WoS ResearcherID: N-1134-2016, IstinaResearcherID (IRID): 994605, AuthorID: 56116998300; e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru.

Энтин Андрей Львович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, МГУ имени М. В. Ломоносова; научный сотрудник, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; SPIN-код: 2012-3433; AuthorID: 918625; WoS ResearcherID: V-3775-2017; Scopus Author ID: 57202589652, ORCID: 0000-0002-0350-5587; e-mail: aentin@geogr.msu.ru.

Толкачева Василиса Федоровна, инженер, Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; SPIN-код: 7337-0841, AuthorID: 1116285, ORCID: 0009-0009-5093-6476, WoS ResearcherID: JOK-0533-2023; e-mail: vasilisa.tolkachevag@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris I. Gartsman, D. Sc. (Geography), Associate Professor, Chief Researcher, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia; SPIN:7792-9120, ORCID: 0000-0002-5876-7015; email: gartsman@inbox.ru.

Sergey V. Kharchenko, Ph. D. (Geography), senior researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; researcher, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-2823-5747, WoS ResearcherID: N-1134-2016, IstinaResearcherID (IRID): 994605, AuthorID: 56116998300; e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru.

Andrey L. Entin, Ph. D. (Geography), senior researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; researcher, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; SPIN-code: 2012-3433; AuthorID: 918625; WoS ResearcherID: V-3775-2017; Scopus Author ID: 57202589652, ORCID: 0000-0002-0350-5587; e-mail: aentin@geogr.msu.ru.

Vasilisa F. Tolkacheva, engineer, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; SPIN-code: 7337-0841, AuthorID: 1116285, ORCID: 0009-0009-5093-6476, WoS ResearcherID: JOK-0533-2023; e-mail: vasilisa.tolkachevag@yandex.ru.