

Д. А. Игнатенко<sup>1</sup>, А. В. Кочетова<sup>2</sup>

## РАНЖИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПО ВЕКТОРНЫМ МОДЕЛЯМ С ПОМОЩЬЮ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

### АННОТАЦИЯ

Информация о порядках водотоков используется для решения картографических, гидрологических и геоморфологических задач. Существующие методы расчета матриц направления стока и водосборной площади с последующим ранжированием требуют привлечения большого количества вычислительных ресурсов и позволяют использовать ограниченное количество алгоритмов упорядочивания водотоков преимущественно в системах «сверху вниз». Более того, модели гидрографической сети часто представлены именно в векторном формате, в то время как методы и инструменты определения порядков водотоков по таким данным практически отсутствуют. Целью настоящего исследования стала разработка метода автоматизированного ранжирования векторных моделей водотоков в системе «снизу вверх». Важной особенностью векторных моделей гидрографической сети является возможность многократных пересечений объектов в местах разделения реки на рукава и последующего их слияния ниже по течению. Учитывая эти обстоятельства, исследование проводилось на векторных геоинформационных моделях северных рек, протекающих в Европейской части России в пределах холмистых равнин и низменностей с целью обеспечения эффективного тестирования ввиду более частой встречаемости данного явления на указанных территориях. Предлагаемый в этом исследовании алгоритм позволяет обрабатывать участки деления реки на рукава различными способами: присвоение всем рукавам порядка, определенного для данного водотока; выбор главного рукава и присвоение остальным второстепенного; выбор главного рукава и удаление второстепенных. Выбор зависит от целей моделирования гидрографической сети: при анализе иерархической структуры может быть полезно присвоение одинаковых порядков, а при картографировании может быть использована каждая из этих опций в зависимости от масштаба и предполагаемой детальности картографического изображения. Работа алгоритма сравнивается с ранжированием по матрицам водосборной площади, методом графов и со специализированным инструментом геоинформационной системы GRASS на данных с различной детальностью, что позволяет продемонстрировать преимущества и недостатки предлагаемого метода.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** векторные гидрографические модели, порядки водотоков, моделирование гидрографии в ГИС, ранжирование линейных объектов

---

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, 10-я линия Васильевского острова, д. 33, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* [darya.ignatenko@spbu.ru](mailto:darya.ignatenko@spbu.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, 10-я линия Васильевского острова, д. 33, Санкт-Петербург, Россия, 199178, *e-mail:* [st110592@student.spbu.ru](mailto:st110592@student.spbu.ru)

Daria A. Ignatenko<sup>1</sup>, Alisa V. Kochetova<sup>2</sup>

## RANKING HYDROGRAPHIC NETWORKS BY VECTOR MODELS USING GEOSPATIAL TECHNOLOGIES

### ABSTRACT

Stream orders can be used for mapping, as well as for resolving hydrological and geomorphological issues. The existing methods of calculating flow direction and accumulation matrices with subsequent ranking require a large amount of computational resources and allow the use of mainly “top-down” ordering systems. Moreover, hydrography is often presented in vector format, while methods and tools for determining stream orders based on such data are practically absent. In this regard, the aim of the study was to develop a method for automated vector stream ordering with the use of “bottom-up” system. An important feature of vector hydrography is the possibility of multiple intersections of objects at the parts where the river divides into branches and then they merge downstream. Considering these circumstances, the study was conducted for the northern rivers in the European part of Russia within the rolling plains and lowlands in order to ensure more effective testing due to the more frequent occurrence of this phenomenon in that area. The algorithm proposed in this paper allows to process braided streams in various ways: assigning the order of the main branch to all of the branches; selecting the main branch and assigning the rest of them secondary orders; selecting the main branch and removing the secondary ones. The choice depends on the purpose of the hydrographic network modeling: when analyzing the hierarchical structure, it may be useful to assign the same orders, and when mapping, each of these options can be used depending on the scale and the expected detail of the map. The ordering of vector hydrography models of varying detail done by the developed algorithm was compared with ordering by runoff accumulation matrices, by the graph method and with a specialized tool of the GRASS GIS, which made it possible to demonstrate the advantages and disadvantages of the proposed method.

**KEYWORDS:** vector hydrography, stream ordering, hydrography modeling in GIS, lines ranking

### ВВЕДЕНИЕ

Создание векторных моделей речных сетей в геоинформационных системах осуществляется для решения различных задач. Векторное представление гидрографической сети — неотъемлемая часть географической основы карт. Информация о положении гидрографических объектов необходима для восприятия картографических изображений, т. к. она служит ориентиром для определения местоположения других географических объектов относительно водотоков. Однако это возможно лишь при корректном моделировании, когда учитывается иерархия отображаемой речной сети, порядок водотоков. Переменная ширина векторного объекта, зависящая от порядка водотока, применяется для отображения гидрографической сети и ее иерархической структуры. В противном случае большое количество линейных объектов одинакового вида негативно сказывается на качестве картографического изображения.

---

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 33, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia,  
*e-mail:* [darya.ignatenko@spbu.ru](mailto:darya.ignatenko@spbu.ru)

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 33, 10th line of Vasilyevsky island, St. Petersburg, 199178, Russia,  
*e-mail:* [st110592@student.spbu.ru](mailto:st110592@student.spbu.ru)

Помимо картографирования, векторные геоинформационные модели водотоков играют важную роль в структурном анализе речных систем. Модели могут быть использованы для выполнения гидрографических расчетов, проведения гидрологических исследований или согласования с цифровыми моделями рельефа, что позволяет, например, определять границы водосборных бассейнов [Jenson, Domingue, 1998]. При анализе гидрографических сетей ранжирование и систематизация необходимы с позиции как гидрологии, так и геоморфологии. Говоря о гидрологическом аспекте, стоит упомянуть связи между гидрологическими (расход воды, скорость течения и др.) и гидрографическими (площадь водосбора, длина водотока и др.) характеристиками водотоков одного порядка, а также изменения этих параметров при переходе от одного порядка к другому [Ласточкин, 1991]. Притоки обычно менее полноводны, чем реки, в которые они впадают, а скорости их течения, наоборот, выше [Медведков, Рогачев, 2009]. Проявление геоморфологического аспекта заключается в идее об одновозрастности долин рек одного порядка [Ласточкин, 1991]. Возраст речных долин притоков, как правило, меньше, чем у принимающих рек [Дедков, 1967; Философов, 1975]. Соответственно, информация о порядках может быть использована в качестве одного из вспомогательных параметров для приближенного расчета ряда гидрологических, гидрографических и геоморфологических характеристик с некоторым уровнем допущений.

Разработано немало количество инструментов для определения порядка водотоков по растровым моделям, в т. ч. «Stream Order» в наборе инструментов Spatial Analyst для геоинформационной системы ArcGIS, «streamorder» в модуле PCRaster Tools для QGIS или «r.stream.order» для геоинформационной системы GRASS. В данных случаях цифровые модели рельефа (ЦМР) используются для расчета матриц направления стока и водосборной площади. Однако модели гидрографической сети часто бывают представлены не в растровом, а в векторном формате, как в случае использования открытых источников (OpenStreetMap, Natural Earth, HydroSHEDS, ВСЕГЕИ), так и при ручной векторизации картографических материалов. При этом на данный момент работ, посвященных определению порядков водотока по векторным данным, а также готовых инструментов, позволяющих осуществлять данную процедуру, несоизмеримо меньше в сравнении растровыми данными.

Модуль «v.stream.order»<sup>1</sup> для геоинформационной системы GRASS предназначен для ранжирования водотоков на основе векторной модели гидрографической сети с указанием точек в устьевых зонах главных рек. Входной векторный файл должен быть топологически корректен, т. к. реализованные алгоритмы упорядочения водотоков основаны на топологических отношениях между линиями и узлами и не предназначены для обработки возможных ошибок и неоднократных пересечений. Алгоритм поддерживает упорядочивание по Стралеру, Шриве, Шейдеггеру и Дрвалу — системы «сверху вниз».

Стоит отметить алгоритм ранжирования сегментов речной сети с использованием графов<sup>2</sup>, реализованный в виде программного модуля Lines Ranking для геоинформационной системы QGIS. На основании протяженности сегментов ребрам графа присваиваются веса, строится опорный маршрут (кратчайший путь между замыкающей и самой удаленной вершинами), вершины ранжируются по удаленности и граф обходится итеративно с изоляцией рассматриваемых подграфов и ранжированием. Так, опорный маршрут рассматривается как главная река, а остальные участки — как притоки. Для этого требуется

---

<sup>1</sup> Radinger J., Gebbert S. v.stream.order. GRASS GIS manual. Web resource: <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/addons/v.stream.order.html> (accessed 23.05.2025)

<sup>2</sup> Сарафанов М., Борисова Ю. Алгоритм ранжирования сегментов речной сети с использованием графов для геоинформационного анализа. Хабр. Электронный ресурс: <https://habr.com/ru/articles/514526> (дата обращения 10.03.2025)

указать замыкающую вершину (место впадения главной реки в водоем). Среди недостатков можно выделить невозможность ранжирования с использованием классической восходящей системы, а также удаление из результирующего файла сегментов, необработанных по тем или иным причинам (недостаточное указанное расстояние привязки, топологические проблемы в исходных данных и т. д.), что ведет к потере данных.

Принципиально иной метод анализа гидрографических сетей по векторным данным подразумевает автоматическую идентификацию выходных узлов и определение соединений между линейными объектами в рамках водотока с использованием ЦМР в качестве вспомогательных данных [Lindsay et al., 2019]. Это позволяет работать с векторными моделями, содержащими большое количество топологических ошибок, что несомненно является преимуществом в сравнении с другими методами. Однако существенным недостатком является необходимость использования растровых данных, что ограничивает применимость метода в случае работы с набором данных на большие территории.

Так, широкие возможности применения информации о порядках водотоков в географических исследованиях, а также несовершенство и немногочисленность инструментов ранжирования по векторным моделям обусловили необходимость проведения настоящего исследования. Его целью стала разработка алгоритма автоматизированного определения порядка водотоков по векторным гидрографическим моделям, которая позволила бы получать пригодную для последующего картографирования или иного использования информацию об иерархии речной сети. Алгоритм позволяет учитывать возможности многократных пересечений векторных объектов, репрезентирующих рукава, впадающих ниже по течению в ту же реку. А использование пространственного индекса при проверке пространственных отношений между векторными объектами существенно ускоряет процедуру ранжирования по сравнению с имеющимися немногочисленными решениями.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранжирование водотоков заключается в присвоении каждому из них некоего числа на основании определенных критериев. Данная процедура осуществляется с целью упорядочения системы и получения информации об иерархии гидрографической сети. Существует два подхода к определению порядков водотоков: «снизу вверх» (восходящий, от устья к истоку, от главной реки до самой малой) и «сверху вниз» (нисходящий, от истока к устью, начиная с водотоков, не имеющих притоков) [Ласточкин, 1991].

К восходящим системам относятся классификации Гаврелиуса (притоки нумеруются, начиная с единицы для рек, впадающих в главную) и Хака (главная река имеет порядок 1, а каждый ее непосредственный приток — 2 и т. д. [Hack, 1957]). Этот подход — «классический» в гидрологии. В геоинформатике он находит применение не только при картографировании сети водотоков, но и при проведении более сложных операций с моделями речных систем в ГИС, таких как, например, сопоставление ЦМР с эталонными гидрографическими линиями в целях согласованной генерализации ЦМР (конфляции ЦМР и водотоков) [Samsonov, 2020].

Нисходящие системы предлагались многими авторами, начиная с Хортон, в классификации которого еще сохраняется выделение главного водотока, как в классической восходящей системе. Водотокам, расположенным выше первых точек слияния, присваивается первый порядок, слиянием двух водотоков первого порядка образует водоток второго порядка и т. д. Затем производится переобозначение, когда водоток с наиболее высоким порядком продолжается вверх по течению до его истоков и всем этим участкам присваивается единый порядок [Horton, 1945]. Отказавшись от выделения главных водотоков, некоторые авторы предлагали свои системы упорядочивания, например, систему Хортон, но без перенумерации [Strahler, 1957; Философов, 1975] или систему, учитывающую

закономерности изменения гидрологических параметров вниз по течению [Ржаницын, 1960]. Вводятся и системы, в которых порядок каждого водотока определяется величиной, равной сумме порядков всех расположенных выше по течению [Shreve, 1966].

Нисходящий подход без определения главного водотока позволяет выделять в речной системе фрагменты со схожими гидрологическими характеристиками, однако выделение главного водотока важно с позиции как геоморфологии (выделение линии билатеральной симметрии для речного бассейна) [Ласточкин, 1991], так и картографии (корректное моделирование гидрографических сетей и соблюдение правил картографирования и генерализации для отражения наиболее важных особенностей и элементов системы). Толщина притоков позволяет пользователю карты визуально отделить их от впадающих водотоков иного ранга, даже если в реальности данные водотоки схожи по водности и ширине русла.

В связи с этим в рамках настоящего исследования для автоматизации ранжирования водотоков выбрана восходящая система, в которой нумерация начинается с нуля.

Так, методика, позволяющая автоматизированно определять порядки водотоков по векторным гидрографическим моделям, подразумевает следующее. В векторном линейном наборе пространственных данных, представляющем гидрографическую сеть, идентифицируются и вручную выделяются объекты, соответствующие главным рекам. Таким векторным объектам автоматически присваивается порядок «0». Далее автоматизированно определяются объекты векторного слоя, пересекающиеся с главными водотоками. Для оптимизации проверки пересечения используется пространственный индекс. Так, объектам, пересекающимся с главным водотоком, присваивается значение «1». Алгоритм завершает работу, когда все объекты проиндексированы.

Реализация данной методики осуществлена на языке программирования Python с использованием программных библиотек QGIS и предназначена для работы в данной геоинформационной системе: необходимо добавить интересующий набор линейных гидрографических объектов в область карты, выбрать объекты (Select Features), представляющие главные реки, и запустить алгоритм.

Однако такая методика обладает рядом недостатков. Подразумевается топологическая корректность векторной модели гидрографической сети, подаваемой на вход. Прежде всего она заключается в отсутствии висячих узлов (недоведенных сегментов). Это решается путем задания расстояния привязки для автоматизированного соединения друг с другом близкорасположенных, но непересекающихся объектов.

Еще одно требование к исходным данным — отсутствие псевдоузлов (в контексте ситуаций, когда несколько сегментов, относящихся к одному водотоку, представлены разными векторными объектами). Тем не менее, этого также можно добиться автоматизированно, к примеру, путем объединения всех сегментов по значению уникального для каждого водотока поля атрибутивной таблицы (если такое имеется). Прежде, чем воспользоваться предложенным алгоритмом, необходимо осуществить процедуру коррекции топологии. Иными словами, одним из основных требований ко входным данным является соответствие одного водотока лишь одному векторному объекту.

Важная особенность алгоритма заключается в обработке случаев многократных пересечений векторных объектов. По векторной модели гидрографической сети не всегда можно судить о том, какой из рукавов является главным. В ситуациях многократных пересечений необходимо исходить из целей ранжирования: при картографировании может быть полезно удаление таких рукавов и отражение единого русла (в зависимости от масштаба и степени генерализации), а при изучении структуры сети может потребоваться обозначение всех рукавов, как одного водотока с одинаковым значением порядка. Предлагаемое решение — выбор при запуске алгоритма одного из параметров: относиться к

рукаву, как к притоку, присваивать рукавам единый порядок или удалять такие объекты. Для этого при проверке геометрий объектов на пересечение стоит найти геометрию пересечения, которая будет являться либо точкой (тогда происходит обычное присвоение порядка), либо мульти-точкой (в такой ситуации и будет применяться одна из выбранных опций для обработки многократных пересечений).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В связи с тем, что одной из задач данного исследования является разработка алгоритма, позволяющего корректно обрабатывать многорукавные участки русел, в качестве тестовых данных решено было использовать векторную линейную модель гидрографической сети для северных рек, протекающих в Европейской части России. Эти реки протекают преимущественно в пределах холмистых равнин и низменностей, следовательно, деление их русел на рукава встречается чаще, что позволит более эффективно протестировать алгоритм. Важно отметить, что данные модели были предварительно подготовлены так, что одному водотоку соответствует один векторный объект.

Рассмотрим результаты работы предложенного алгоритма в верхнем течении Северной Двины (рис. 1d) в сравнении с ранжированием сегментов речной сети с использованием графов с помощью дополнительного модуля для QGIS (рис. 1b), с определением порядков водотока путем расчета водосборных площадей для ячеек цифровой модели местности ALOS World 3D инструментами геоинформационной системы ArcMap (рис. 1a) и с ранжированием по результатам работы инструмента «v.stream.order» геоинформационной системы GRASS (рис. 1c). Во всех случаях (кроме предлагаемого алгоритма) была использована классификация Стралера, т. к. доступны лишь системы «сверху вниз», а классификация по Стралеру возможна во всех перечисленных инструментах, что обеспечивает сравнимость результатов.

Реки Юг и Сухона, слияние которых приводит к образованию Северной Двины, не определяются как равнозначные при расчете с использованием графов и в GRASS GIS. Рукавам Северной Двины во всех трех случаях (рис. 1a–c) присваиваются разные порядки. Стоит отметить, что данные алгоритмы используют разные параметры при выборе главного русла; соответственно, в одном случае выбран восточный рукав (при этом западный не доведен до конца и считается обычным притоком), а в других — западный. При этом графовым методом восточному рукаву присвоен наименьший порядок, в то время как «v.stream.order» обозначает его как 3.

Предложенный алгоритм (рис. 1d) позволил присвоить равноправным притокам и рукавам одинаковые значениями, определить Юг и Сухону как равнозначные, а также применить восходящую систему классификации водотоков.

Рассмотрим упомянутые алгоритмы при работе в более крупном масштабе с более детальными данными и многорукавным руслом. Ранжирование водотоков по цифровой модели местности с пороговым значением 50 000 ячеек (рис. 2a) закономерно является лишь более детальной версией 500 000 ячеек (рис. 1a): многократные пересечения не поддерживаются данным алгоритмом.

При ранжировании с помощью графов (упомянутый ранее метод, реализованный в программном модуле Lines Ranking для QGIS) части проток присваиваются равнозначные порядки, а другой части — отличающиеся (рис. 2b). При этом логика такого ранжирования в случае многорукавных русел не до конца ясна. Это также не позволяет рекомендовать данный метод для ранжирования детальных моделей гидрографической сети с многорукавными участками.

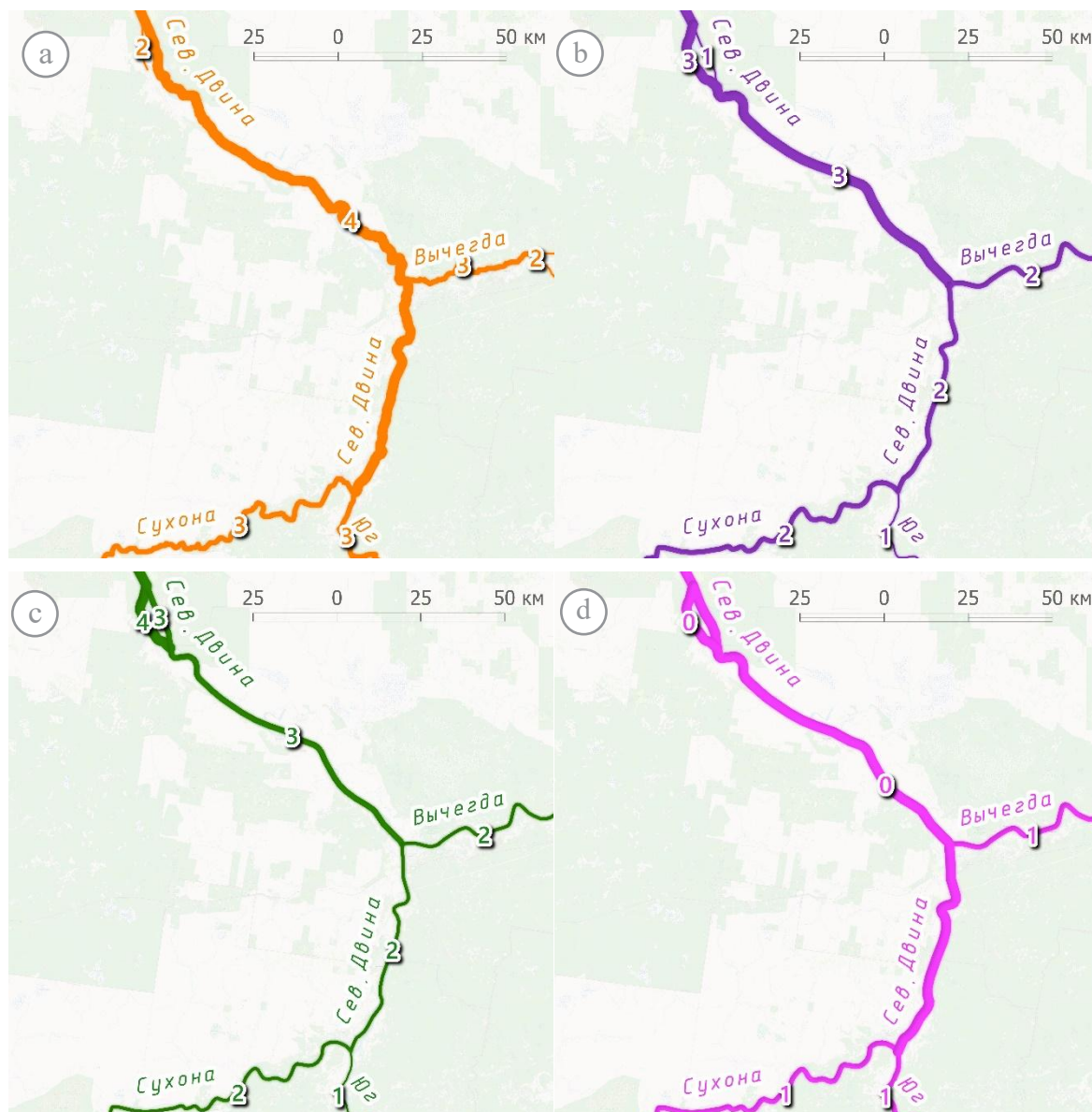


Рис. 1. Ранжирование водотоков: а) по Стралеру с предварительным расчетом матрицы площадей водосбора (пороговое значение — 500 000 ячеек), б) по Стралеру с использованием графов, с) по Стралеру с использованием инструментов GRASS, д) предлагаемым алгоритмом  
 Fig. 1. Stream ordering using: a) Strahler ordering on flow accumulation matrix (500 000 cells threshold), b) Strahler ordering for graphs, c) Strahler ordering with GRASS tools, d) the proposed algorithm

Инструмент «v.stream.order» в геоинформационной системе GRASS обрабатывает модели участков с большим количеством рукавов наименее корректным образом: в выходном файле остается лишь главное русло и одна из проток (рис. 2с).

Разработанный в рамках данного исследования алгоритм помимо отнесения рукавов к притокам первого порядка (рис. 2е) позволяет отнести все рукава к одному рангу (рис. 2д) или оставить лишь главное русло, убрав все объекты, пересекающиеся с ним более одного раза (рис. 2ф).

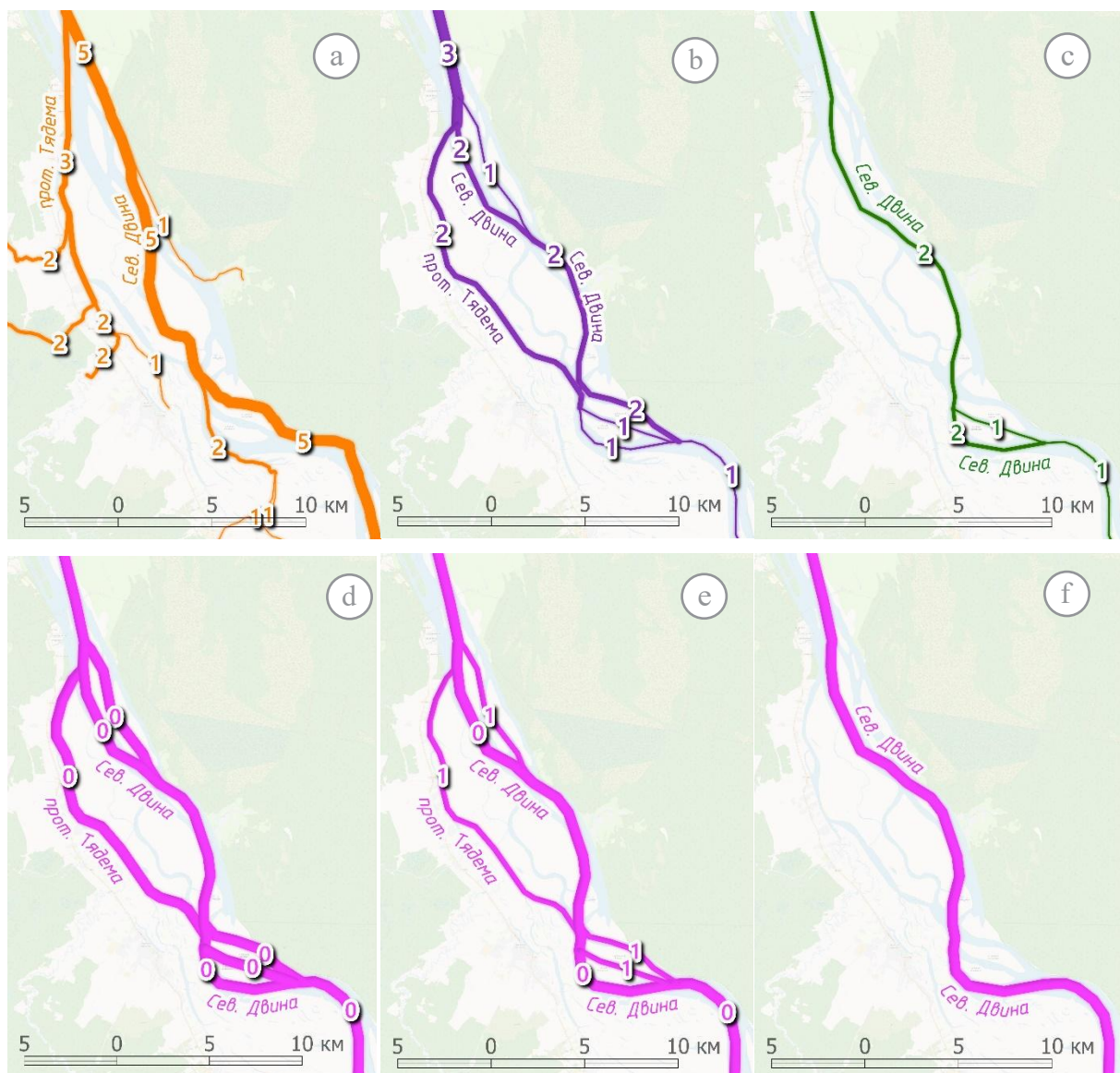


Рис. 2. Обработка многорукавных участков рек в местах ветвления на рукава: а) определение главного и второстепенного (недоведенного) рукава по матрице водосборных площадей (пороговое значение — 50 000 ячеек), б) ранжирование по Стралеру с использованием графов, в) ранжирование по Стралеру с использованием инструментов GRASS, д) присвоение второстепенным рукавам меньшего порядка с помощью предлагаемого алгоритма, е) присвоение всем рукавам одного порядка с помощью предлагаемого алгоритма, ф) удаление второстепенных рукавов с помощью предлагаемого алгоритма

Fig. 2. Ways of handling braided streams: a) determining main and secondary (incomplete) branches according to the flow accumulation matrix (threshold value — 50 000), b) Strahler ordering for graphs, c) Strahler ordering with GRASS tools, d) assigning lower orders to secondary branches using the proposed algorithm, e) assigning the same order to all branches using the proposed algorithm, f) removing secondary branches using the proposed algorithm

Как упоминалось ранее, полученная информация о порядках водотоков может быть использована как для проведения гидрологических и геоморфологических исследований, так и в целях картографирования речных систем. Говоря о визуализации водотоков с учетом иерархической структуры гидрографической сети (определенной как с помощью разработанного алгоритма, так и вручную), важно отметить, что полученные представления векторных объектов все же не являются аналогом ручной доработки данных в графических редакторах, например, для подготовки карты к изданию. Такой прием лишь позволяет получить более наглядное представление (рис. 3b) в сравнении с отображением водотоков как линейных объектов без стилизации (рис. 3a).

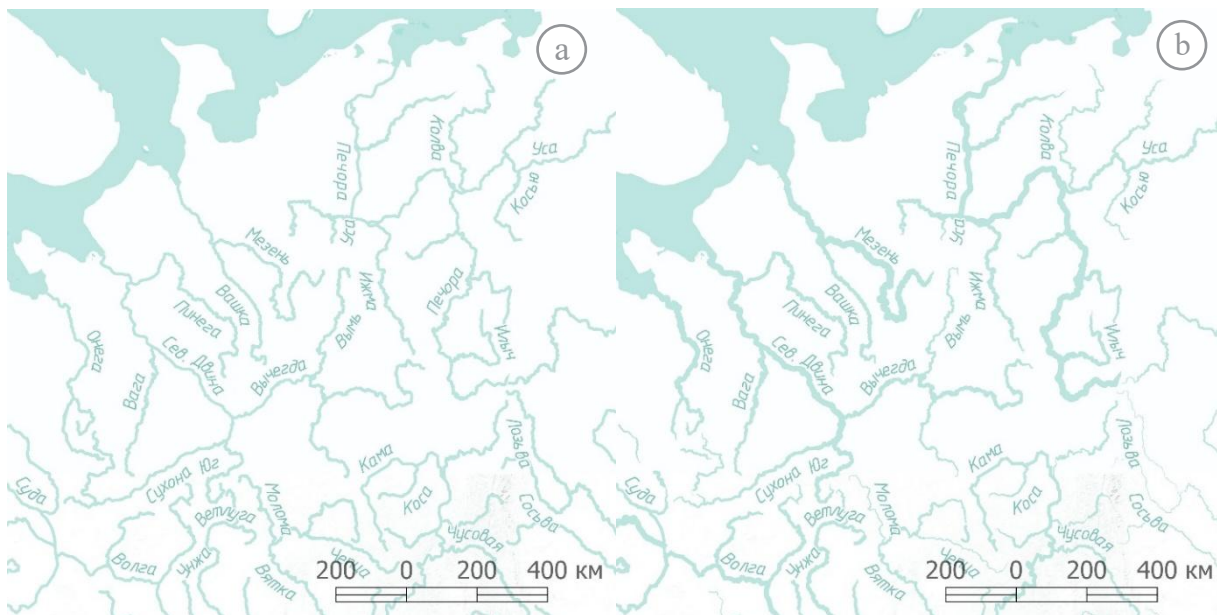


Рис. 3. Пример автоматизированного отображения векторной модели гидрографической сети: а) линейными объектами одинаковой толщины, б) с использованием информации о порядке водотоков

Fig. 3. An example of automated mapping of vector hydrography: a) with lines of the same thickness, b) by using stream orders to define thickness

## ВЫВОДЫ

В рамках настоящего исследования разработан метод автоматизации ранжирования векторных моделей гидрографических сетей по системе «снизу вверх». Алгоритм, реализованный на языке Python и предназначенный для работы в геоинформационной системе QGIS, использует пространственный индекс для определения взаимных пересечений векторных объектов, что позволяет присвоить водотокам соответствующие порядки с применением системы «снизу вверх», затратив на это минимальное время.

Помимо определения порядков для притоков метод предполагает выбор одного из вариантов обработки многорукавных русел в зависимости от цели моделирования (картографирование в различных масштабах или анализ иерархической структуры сети водотоков):

- Один из рукавов считается главным, остальным задается второстепенный порядок. Так работают многие алгоритмы, в т. ч. при выделении и ранжировании водотоков по цифровым моделям рельефа, однако не всегда это является отражением действительности. Данный вариант применим в ситуациях, когда необходимо показать главное русло, не потеряв при этом в детальности.

- Все рукава, относящиеся к определенному водотоку, имеют присвоенный ему порядок. Это может быть полезно при анализе иерархической структуры или в целях среднемасштабного картографирования.
- Один из рукавов считается главным, а остальные удаляются, что может быть использовано при мелкомасштабном картографировании.

Такие участки определяются при поиске пересечений водотоков путем выявления мультиточек, которые свидетельствуют о неоднократном пересечении векторных объектов.

Разработанный метод автоматизированного ранжирования может найти применение как при моделировании речных систем с целью картографирования, так и для решения гидрологических и геоморфологических задач. В качестве продолжения данного исследования можно рассматривать разработку метода автоматизированного определения главных водотоков, а также способа поэлементного (а не пообъектного) ранжирования векторных моделей гидрографической сети с применением восходящей системы, что позволило бы значительно сократить время на подготовку данных перед непосредственным определением порядков водотоков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дедков А. П.* О связи порядка и возраста речных долин. Вопросы морфометрии. Вып. 2. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1967. С. 75–87.
- Ласточкин А. Н.* Рельеф земной поверхности (Принципы и методы статистической геоморфологии). Л.: Недра, 1991. 340 с.
- Медведков А. А., Рогачев С. В.* Река и приток: кто есть кто? География, 2009. № 13. С. 15–22.
- Ржаницын Н. А.* Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 238 с.
- Философов В. П.* Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1975. 232 с.
- Hack J. T.* Studies of Longitudinal Stream-Profiles in Virginia and Maryland. U.S. Geological Survey Professional Paper 294B, 1957. P. 45–97.
- Horton R. E.* Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. Geological Society of America Bulletin, 1945. V. 56. No. 3. P. 275–370. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2.
- Jenson S. K., Domingue J. O.* Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988. V. 54. No. 11. P. 1593–1600.
- Lindsay J. B., Yang W., Hornby D. D.* Drainage Network Analysis and Structuring of Topologically Noisy Vector Stream Data. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019. V. 8. No. 9. DOI: 10.3390/ijgi8090422.
- Samsonov T. E.* Automated Conflation of Digital Elevation Model with Reference Hydrographic Lines. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020. V. 9. No. 5. P. 1–40. DOI: 10.3390/ijgi9050334.
- Shreve R. L.* Statistical Law of Stream Numbers. The Journal of Geology, 1966. V. 74. No. 1. P. 17–37. DOI: 10.1086/627137.
- Strahler A. N.* Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions, American Geophysical Union, 1957. V. 38. No. 6. P. 913–920. DOI: 10.1029/tr038i006p00913.

## REFERENCES

- Dedkov A. P.* On the relationship between the order and age of river valleys. *Morphometry Issues*. Iss. 2. Saratov: Publishing House of Saratov University, 1967. P. 75–87 (in Russian).
- Filosofov V. P.* Fundamentals of the morphometric method of searching for tectonic structures. Saratov: Publishing House of Saratov University, 1975. 232 p. (in Russian).
- Hack J. T.* Studies of Longitudinal Stream-Profiles in Virginia and Maryland. U.S. Geological Survey Professional Paper 294B, 1957. P. 45–97.
- Horton R. E.* Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 1945. V. 56. No. 3. P. 275–370. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2.
- Jenson S. K., Domingue J. O.* Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988. V. 54. No. 11. P. 1593–1600.
- Lastochkin A. N.* Relief of the Earth's Surface (Principles and Methods of Statistical Geomorphology). Leningrad: Nedra, 1991. 340 p. (in Russian).
- Lindsay J. B., Yang W., Hornby D. D.* Drainage Network Analysis and Structuring of Topologically Noisy Vector Stream Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019. V. 8. No. 9. DOI: 10.3390/ijgi8090422.
- Medvedkov A. A., Rogachev S. V.* River and Tributary: Who is Who? *Geography*, 2009. No. 13. P. 15–22 (in Russian).
- Rzhanitsyn N. A.* Morphological and hydrological patterns of the structure of the river network. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1960. 238 p. (in Russian).
- Samsonov T. E.* Automated Conflation of Digital Elevation Model with Reference Hydrographic Lines. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020. V. 9. No. 5. P. 1–40. DOI: 10.3390/ijgi9050334.
- Shreve R. L.* Statistical Law of Stream Numbers. *The Journal of Geology*, 1966. V. 74. No. 1. P. 17–37. DOI: 10.1086/627137.
- Strahler A. N.* Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 1957. V. 38. No. 6. P. 913–920. DOI: 10.1029/tr038i006p00913.
-