

А. В. Кочетова¹, Д. А. Игнатенко², И. Е. Сидорина³

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОТОКА

АННОТАЦИЯ

Глобальные цифровые модели местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) среднего пространственного разрешения (30 м) традиционно используются для извлечения векторной гидрографической основы на большие территории. В статье рассмотрена возможность выделения водотока инструментами геоинформационных систем применительно к региональной цифровой модели местности ArcticDEM высокого (2 и 10 м) и среднего (32 м) пространственного разрешения для оценки корректности и целесообразности такого подхода в моделировании гидрографии. Поскольку алгоритм выделения водотока зависит от рельефа прилегающих территорий, для исследования выбраны три объекта — р. Северная Двина, р. Мойеро и р. Мома, протекающие в различных физико-географических условиях. Для валидации результатов выделения водотоков по ЦММ и ЦМР построены их эталонные объекты. Рассмотрен фактор производительности персонального компьютера при обработке данных высокого пространственного разрешения. Выявленная зависимость времени расчета промежуточных слоев для выделения водотока от пространственного разрешения цифровой модели местности предоставляет возможность оценить предполагаемую нагрузку на конкретный персональный компьютер при проведении схожих исследований. Установлено, что выделение водотока по моделям высокого пространственного разрешения не может гарантировать увеличение корректности векторной гидрографической основы. На примере участка р. Северной Двины по ЦММ и ЦМР построены продольные профили рельефа местности, которые позволяют судить о качестве исходных данных перед использованием алгоритма выделения водотока. По продольным профилям можно идентифицировать артефакты моделей в местах нехарактерно больших перепадов высот. Эти же участки будут наиболее некорректными в результирующей векторной гидрографической основе, а значит, в прикладных географических исследованиях им стоит уделять повышенное внимание.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: векторная гидрографическая основа, моделирование гидрографических объектов, ArcticDEM, производительность ПК при выделении гидрографии

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034,

e-mail: st110592@student.spbu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034,

e-mail: st110672@student.spbu.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, кафедра картографии и геоинформатики, Университетская наб., д. 7-9, 199034, Санкт-Петербург, Россия, 199034,

e-mail: i.sidorina@spbu.ru

Alisa V. Kochetova¹, Daria A. Ignatenko², Inessa E. Sidorina³

USE OF HIGH SPATIAL RESOLUTION DIGITAL SURFACE MODELS TO WATERLINE DELINEATION

ABSTRACT

Global digital surface (DSM) and elevation (DEM) models of medium spatial resolution (30 m) are traditionally used for extraction of vector hydrography for large areas. The article considers the possibility of waterline delineation by the tools of geographic information systems in relation to the regional digital surface model ArcticDEM of high (2 and 10 m) and medium (32 m) spatial resolution to assess the correctness and feasibility of this approach in hydrographic modeling. Since the algorithm of waterline delineation depends on the relief of the adjacent territories, three objects were selected for the study — the Northern Dvina River, the Moyero River and the Moma River, flowing in different geographical conditions. In order to validate the results of waterline delineation using DSM and DEM, their reference vector objects were created. Computer performance was considered in terms of processing high spatial resolution data. The revealed dependence of the calculation time of auxiliary layers on model's spatial resolution makes it possible to estimate the expected load on a particular personal computer when conducting similar studies. It has been established that the usage of high spatial resolution models for waterline delineation cannot guarantee an increase in the correctness of the resulting vector hydrography. On the example of the part of the Northern Dvina River, longitudinal profiles of the terrain were constructed using DSM and DEM, which allow us to judge the quality of the initial data before using the waterline delineation algorithm. The longitudinal profiles can be used to identify model artifacts in places of unusually high elevation differences. These same areas will be the most incorrect in the resulting vector hydrographic objects, which means that they should be given more attention when performing automated delineation and validating its results.

KEYWORDS: vector hydrographic networks, modeling of hydrographic, ArcticDEM, computer performance for hydrography delineation

ВВЕДЕНИЕ

Одной из общих проблем в области картографии, геоинформатики и дистанционного зондирования Земли является проблема получения корректных исходных данных. Векторная гидрографическая основа является важным элементом общегеографического и тематического картографирования. Ее используют для проведения гидрологических исследований и гидрографических расчетов, для пространственно-временного моделирования речных систем, в т. ч. для автоматизированного определения порядка водотоков сети и др.

Векторные гидрографические основы можно получить несколькими способами:

- с помощью оцифровки топографических карт и/или дешифрирования и оцифровки ДЗЗ;

¹ Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail: st110592@student.spbu.ru*

² Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail: st110672@student.spbu.ru*

³ Saint-Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail: i.sidorina@spbu.ru*

- используя векторные данные с электронных ресурсов (например, такие, как OSM, HydroSHEDS, Natural Earth, ВСЕГЕИ и др.);
- применяя автоматизированное выделение сети водотоков по цифровым моделям местности и рельефа;
- используя искусственный интеллект (методы машинного и глубокого обучения).

К модели векторной гидрографической сети, полученной одним из вышеперечисленных способов, предъявляются определенные требования по достоверности и соответствию объектов своему реальному положению в пространстве. Зачастую исследователи не уделяют должного внимания этапу оценки корректности полученных данных, что приводит к неверной интерпретации пространственной информации об объектах и явлениях.

Опыт гидрографического моделирования огромен. На эту тему написано множество научных статей, учебно-методических пособий, монографий и диссертаций. Быстрое развитие науки и техники, появление новых, современных, вычислительных геоинформационных технологий для пространственного анализа, совершенствование базы исходных данных ДЗЗ, увеличение ее качества — все это позволяет проводить исследования, о которых раньше нельзя было даже помыслить. Так, классический вариант извлечения векторной гидрографической основы из глобальных ЦММ уже не может обеспечить необходимую точность исследований¹. Часто в этом случае речь идет о недостаточном пространственном разрешении исходных данных. С течением времени в открытом доступе появляются и будут появляться более подробные данные о рельефе местности, которые являются малоисследованными для уже тривиальных задач и алгоритмов обработки. Одной из таких моделей, покрывающей значительные территории РФ, является региональная ЦММ арктических территорий высокого пространственного разрешения (2 м) ArcticDEM² — проект Национального агентства геопространственной разведки (National Geospatial-Intelligence Agency, NGA) и Национального научного фонда (National Science Foundation, NSF).

В российском научном сообществе опыт извлечения векторной гидрографической основы по ArcticDEM описан слабо. По гидрологической тематике опубликованы единичные работы, например, об определении морфометрических характеристик водосборов рек Арктической зоны РФ [Решин и др., 2020] или статьи, оценивающие статистические характеристики ранних версий модели ArcticDEM [Полякова и др., 2020].

Зарубежный опыт извлечения векторной гидрографической основы из ЦММ ArcticDEM описан главным образом в работе [Lu et al., 2020]. Предлагается методика выделения водотока, заключающаяся в совместном использовании данных космической съемки и ЦММ. Подробные данные ЦММ ArcticDEM дополняют конвертированные из раstra векторные гидрографические данные, полученные при помощи автоматизированного дешифрирования изображений Sentinel-2. В результате исследования была получена объединенная речная сеть Sentinel-ArcticDEM (SARN) 10 м пространственного разрешения на бассейн р. Котуй (РФ) площадью 12 000 км² и р. Колин площадью 10 000 км² (США). В работе взяты небольшие площади исследования, что не дает возможности оценки применимости предлагаемой методики на более крупных реках. А результирующая векторная гидрографическая основа соответствует не самому высокому пространственному разрешению.

¹ СТО ГГИ 52.08.48–2020 Выбор цифровой картографической основы для определения гидрографических характеристик

² ArcticDEM — Mosaics, Version 4.1. Электронный ресурс: <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?PersistentId=doi:10.7910/DVN/3VDC4W> (дата обращения 27.03.2023)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для создания общегеографических и тематических карт современная картографическая наука использует методы геоинформационного картографирования. Выделяется два основных направления [Лурье, 2008]: создание аналитических карт по данным атрибутивных таблиц баз данных и создание тематических карт на основе методов пространственного моделирования. Тема настоящего исследования относится ко второму направлению и его методам.

Пространственное моделирование в ГИС основано на применении специальных инструментов геоинформационных систем к данным о рельефе территории для составления карт углов наклона, экспозиции и крутизны склонов, эрозионной сети и т. д., в т. ч. для выделения водотока. В работе использованы инструменты пространственного моделирования водотока, реализованные в геоинформационной системе ArcGIS¹ (ArcMap) в модуле Spatial Analyst – Hydrology. Схема выделения водотока приведена на рис. 1.

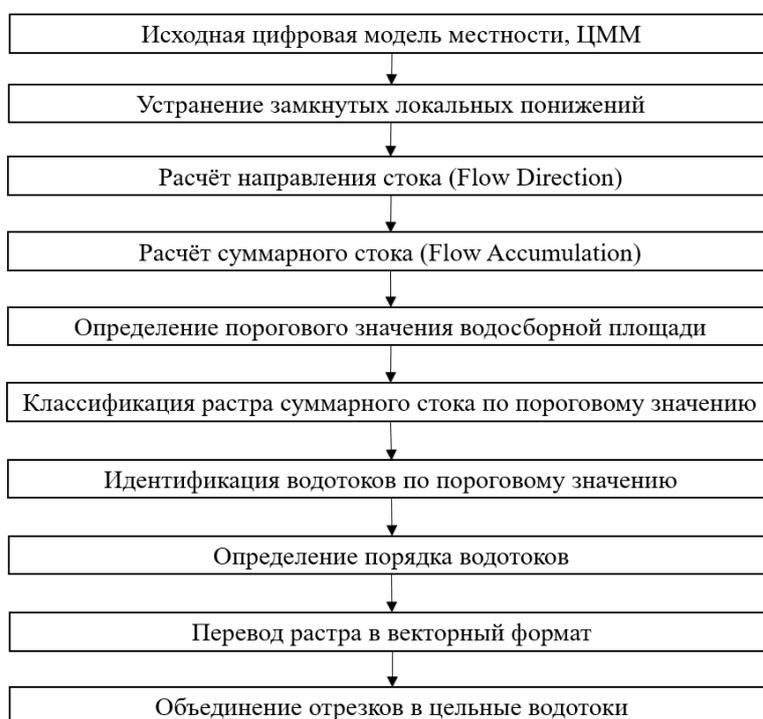


Рис. 1. Алгоритм выделения водотока инструментами геоинформационных систем
Fig. 1. Algorithm of waterline delineation by tools of geographic information systems

Говоря о конкретных алгоритмах, существуют разные методы создания гидрологически корректной модели, расчета направления стока и суммарного стока [Энтин, 2019]. В ArcGIS инструмент заполнения локальных понижений (англ. Fill) использует алгоритм Дженсон-Доминго [Jenson, Domingue, 1988], в результате работы которого на месте локального понижения формируется горизонтальная поверхность путем увеличения высот его ячеек. Алгоритм расчета направления стока (англ. Flow Direction) по методу D8 (англ. Deterministic Eight-Neighbor) [O'Callaghan, Mark, 1984] для каждой ячейки определяет максимальный по модулю отрицательный уклон, представленный в виде линий, соединяющих центральную ячейку с восьмью соседними ее окружающими ячейками в соответствии с закодированными значениями направлений под углом 45°. Суммарный сток

¹ ESRI ArcGIS Desktop: Release 10.8 Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA

(Flow Accumulation) по методу D8 представляет собой растр, в котором каждая ячейка, находящаяся вниз по склону, принимает n -ое количество потоков. Для выделения водотоков по растру суммарного стока необходимо определить пороговое значение, представляющее собой размер элементарной водосборной ячейки, способной генерировать постоянный водоток. Затем выполняется классификация растра суммарного стока с заданным пороговым значением. К классифицируемому растру применяется инструмент идентификации водотока (Stream Link), который присваивает уникальные значения каждому отрезку. На окончательном этапе производится конвертирование растрового представления водотока в векторный формат.

Исследование проведено на примере северных рек России, поскольку цифровая модель местности ArcticDEM является региональной и охватывает арктические территории от 60° с. ш. Для оценки производительности и применения алгоритма выделения водотока использованы файлы мозаики ArcticDEM высокого пространственного разрешения (2 м) в виде листов размером 50 x 50 км в 32-битном формате GeoTIFF, а также версии с уменьшенным средним пространственным разрешением (10 и 32 м), доступные в виде листов размером 100 x 100 км.

Для сравнения также подобраны свободно распространяемые глобальные ЦММ и ЦМР, которые обычно используются для выделения водотока. В табл. 1 приведены основные сведения об используемых в настоящей работе моделях, а также их горизонтальная (англ. Circular Error, CE), вертикальная (англ. Linear Error, LE) точности и средняя квадратическая ошибка (англ. Root Mean Square Error, RMSE) по данным разработчиков. Отмечено, что не все из них проводят оценку точности и предоставляют такую информацию о своих моделях.

Рельеф территории играет решающую роль в формировании речных систем. От особенностей строения речных долин, их морфологических типов зависит корректность работы алгоритма выделения водотоков. Для исследования выбраны три разнородных участка, соответствующие генетическим классам равнинных и горных рек (табл. 2).

Для валидации результатов выделения водотоков по ЦММ и ЦМР по данным OpenStreetMap и космическим снимкам, находящихся в открытом доступе, построены эталонные модели исследуемых рек (рис. 2).

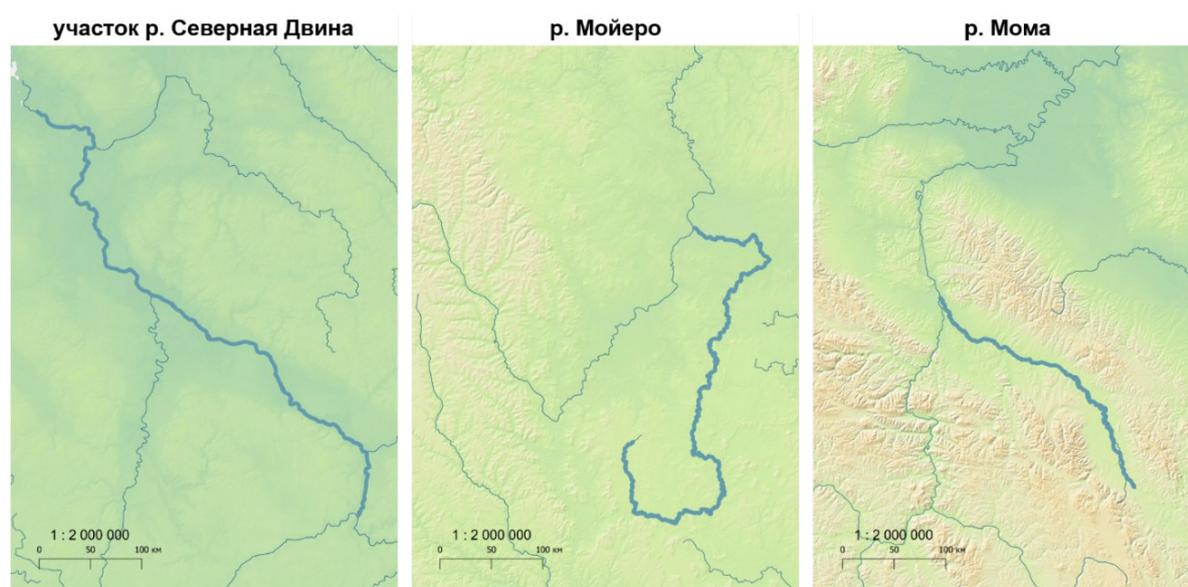


Рис. 2. Эталонные участки рек (визуализация векторных данных)
Fig. 2. Reference river sections (visualization of vector data)

Табл. 1. Цифровые модели местности и рельефа и их характеристики
 Table 1. Digital surface and elevation models and their characteristics

Набор данных	AW3D30 версия 3.2 (2022)	ArcticDEM версия 4.1 (2023)	GLO-30 версия (2021)	FABDEM версия 1.2 (2023)
Исходные данные для построения модели	Панхроматический прибор дистанционного зондирования для стереокартографирования (PRISM), оптический датчик на борту космического аппарата «ALOS».	Отдельные стереоскопические цифровые модели рельефа (ЦМР), полученные на основе пар спутниковых снимков Махаг субметрового пространственного разрешения (от 0,32 до 0,5 м), включая данные «WorldView-1», «WorldView-2», «WorldView-3» и «GeoEye-1»	Радарные данные «WorldDEM» с двух спутников «TerraSAR-X» и «TanDEM-X». Радиолокационная интерферометрия (InSAR), использующая бистатический режим «InSAR StripMap».	Использование методов машинного обучения для удаления зданий и растительности из цифровой модели рельефа «Copernicus Digital Elevation Model»
Разработчик	Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA), Япония	Национальное агентство геопространственной разведки; Национальный научный фонд, США	Европейское космическое агентство (ESA)	Компания «Fathom»; Бристольский университет, Великобритания
Покрытие	82° ю. ш. – 82° с. ш.	Выше 60° с. ш.	90° ю. ш. – 90° с. ш.	
Временной диапазон получения исходных данных	2006–2011	2007–2022	2011–2015	
Сенсор	Оптический	Оптический	Радарный (SAR X Band)	
Пространственное разрешение (м)	30	2, 10, 32	30	30
Абсолютная горизонтальная точность	–	Характеристики абсолютной горизонтальной и вертикальной точностей не были оценены ¹	CE90 — < 6 м	Характеристики абсолютной горизонтальной и вертикальной точностей не были оценены
Абсолютная вертикальная точность	LE90 — 5,37 м RMSE — < 3,28 м		LE90 — < 4 м RMSE — 1,68 м	
Относительная вертикальная точность	–		LE90 для уклонов меньше или равных 20 % — < 2 м; LE90 для уклонов >20 % — 4 м	

¹ Guides PGC DEM Products — ArcticDEM, REMA, and EarthDEM. Web resource: <https://www.pgc.umn.edu/guides/stereo-derived-elevation-models/pgc-dem-products-arcticdem-rema-and-earthdem/> (accessed 15.05.2024)

Табл. 2. Морфометрические характеристики рек
Table 2. Morphometric characteristics of rivers

Название реки	участок р. Северной Двины	р. Мойеро	р. Мома
Тип рельефа	Равнинный	Плоскогорный	Горный
Площадь бассейна (S), км ²	357 052	30 900	30 200
Длина (L), км	664	825	460
Высота истока (H_1), м	98	490	703
Высота устья (H_2), м	0	150	206
Падение (h), м $H_1 - H_2$	98	340	497
Уклон водотока (i), ‰ ($\frac{h}{L} * 100$)	13,7	41	108

Критическим моментом является процедура оценки точности, причем как исходного растрового слоя, так и векторной основы. В первом случае необходимо иметь эталонную поверхность, чтобы вычислить показатели точности, значения которой производителем ArcticDEM не оценены. Сложность заключается в том, что данные о координатах с геодезических пунктов для составления такой поверхности недоступны, а пространственное разрешение ArcticDEM настолько высоко, что нет возможности подобрать более подробные материалы о рельефе территории для сравнения. Во втором случае отсутствует система оценки как таковая. Часто оцениваемыми показателями являются длина реки и площадь водосбора [Пьянков, Шихов, 2017]. Однако фактически такая оценка не может учесть все особенности речных систем и формы их русел.

Поскольку алгоритм выделения водотока зависит от качества исходных данных и рельефа территории, для анализа корректности исходных данных используются продольные профили местности — графики, которые отражают изменения значений высот каждой ЦММ или ЦМР по длине реки от истока до устья. Условием проведения такого анализа является использование одной и той же векторной гидрографической модели водотока (эталонного объекта) для построения продольных профилей по разным источникам данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Учет производительности персонального компьютера при обработке данных высокого пространственного разрешения

При обработке данных высокого пространственного разрешения неизбежно возникают проблемы технического характера, связанные с фактической возможностью осуществления таких вычислений. Исследование производительности персонального компьютера проведено на примере системы с указанными характеристиками (табл. 3).

Установлено, что временные затраты на обработку зависят от нескольких факторов:

- во-первых, от количества файлов мозаики (листов), покрывающих необходимую территорию исследования, которые впоследствии объединяются в единую мозаику;
- во-вторых, от способа сохранения промежуточных слоев, т. е. если производить сохранение на локальной среде компьютера, а не во временные файлы, расчет будет производиться быстрее (к примеру, для одного листа высокого пространственного разрешения (2 м) суммарная разница вычислений промежуточных слоев при разных способах сохранения составляет около четырех минут);
- в-третьих, одновременная работа сторонних программ и выполнение процессов создают дополнительную нагрузку и приводят к возрастанию затрачиваемого на расчет промежуточных слоев времени.

Табл. 3. Системные характеристики персонального компьютера
Table 3. System characteristics of a personal computer

Название компонента	Параметры компонента
Видеоадаптер	Radeon RX 580 Series 8 Гб
Центральное процессорное устройство	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2640 v3 @ 2.60ГГц
Емкость оперативной памяти	16 Гб
Емкость жесткого диска	1 Тб
Емкость твердотельного накопителя	250 Гб
Тип системы	Windows 10, 64-разрядная операционная система, процессор x64

С учетом вышеперечисленных факторов были созданы условия максимальной производительности ПК. На вход подавались данные разного пространственного разрешения. На рис. 3 изображены результаты расчета некоторых промежуточных слоев для выделения водотока по одному листу ($50 \times 50 \text{ км}^2$) цифровой модели местности ArcticDEM различного пространственного разрешения.

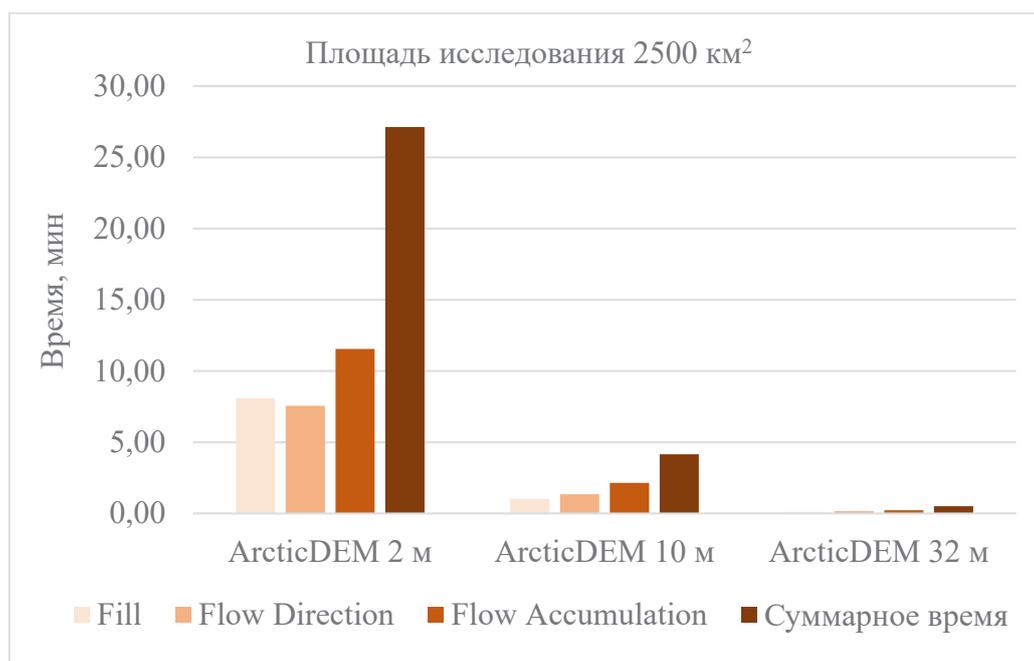


Рис. 3. Зависимость времени расчета промежуточных слоев для выделения водотока от пространственного разрешения ЦММ ArcticDEM
Fig. 3. Dependence of the calculation time of auxiliary layers on the spatial resolution of the ArcticDEM

Аналогичные расчеты проведены для участка р. Северной Двины (рис. 4). Площадь исследования составила $45\,000 \text{ км}^2$ или восемнадцать листов высокого пространственного разрешения (2 м) и девять листов среднего пространственного разрешения (10 и 32 м). Перед выполнением процедуры выделения водотока исходные листы были объединены в единую бесшовную мозаику.

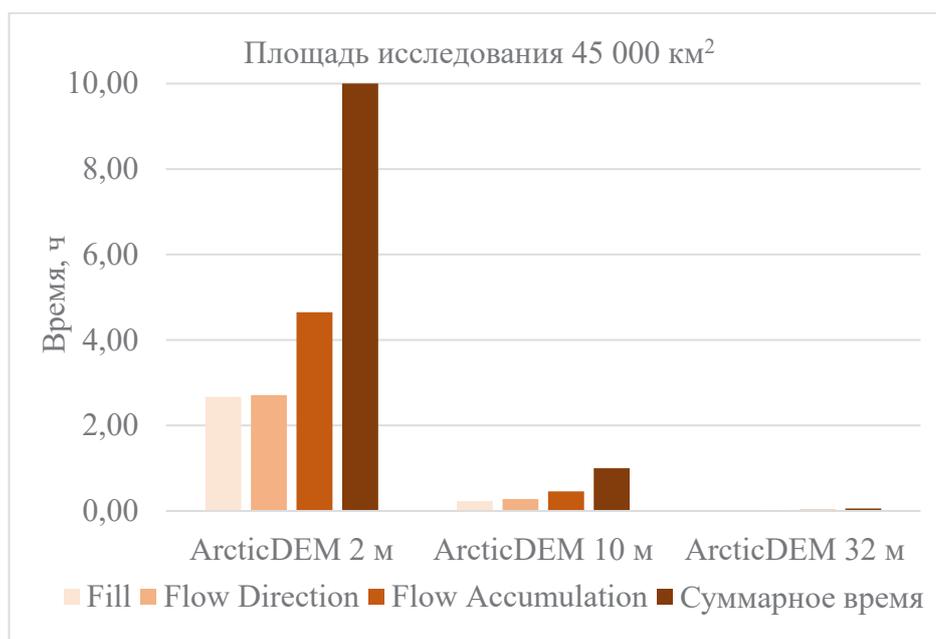


Рис. 4. Зависимость времени расчета промежуточных слоев для выделения водотока от пространственного разрешения ЦММ ArcticDEM на примере участка р. Северной Двины
 Fig. 4. Dependence of the calculation time of auxiliary layers on the spatial resolution of the ArcticDEM on the example of the part of the Northern Dvina River

Проведенные работы позволяют определить приблизительные временные затраты на обработку той или иной территории исследования в зависимости от ее площади, путем умножения времени, затрачиваемого на обработку одного листа на их суммарное количество по формуле (1):

$$T = t * n \quad (1),$$

где t — время, затрачиваемое на обработку одного листа мозаики,
 n — количество листов мозаики.

На основании этого рассчитаны предполагаемые значения времени, затрачиваемого на вычисление промежуточных слоев на примере участка р. Северная Двина. В табл. 4 приведено сравнение предполагаемых и фактических значений, а также разница между ними. Предполагаемое время в каждом случае оказывается меньше фактического, но все же может быть использовано для общей оценки производительности ПК при выделении водотока по полноценным файлам мозаики ЦММ ArcticDEM высокого пространственного разрешения (2 м). Также есть основания полагать, что при обработке цельной мозаики, состоящей из n -го количества листов, алгоритм выделения водотока работает иначе, нежели для одного листа. Вероятно, это связано с краевыми областями, поскольку при присоединении каждого нового листа ($n + 1$) краевые области становятся стыковыми и для них появляется такая же возможность расчета направления стока из центральной в восемь соседних ячеек, что приводит к увеличению нагрузки на ПК. В среднем, если судить по разнице суммарного времени из табл. 4, эта нагрузка выражается в дополнительных 8,4 мин ко времени обработки с добавлением каждого нового листа.

Табл. 4. Предполагаемые и фактические времязатраты для выделения водотока участка р. Северной Двины по бесшовным файлам мозаики ЦММ ArcticDEM высокого пространственного разрешения (2 м)

Table 4. Estimated and actual time required for waterline delineation of the part of the Northern Dvina River using seamless high spatial resolution (2 m) ArcticDEM mosaic files

Название слоя	$t_{\text{предполагаемое}}, \text{ч}$	$t_{\text{фактическое}}, \text{ч}$	$\Delta t, \text{ч}$
Fill	2,42	2,66	-0,24
Flow Direction	2,26	2,71	-0,45
Flow Accumulation	3,47	4,65	-1,18
Суммарное время	8,1	10,02	-1,92

В результате экспериментально было установлено, что для задачи выделения одного лишь участка главной реки (без притоков) системных характеристик среднестатистического персонального компьютера недостаточно. Такая же ситуация наблюдается с р. Мойеро, для обработки которой необходимо задействовать шестнадцать листов (40 000 км²) высокого пространственного разрешения. Извлечь водоток из файлов мозаики удалось лишь для р. Момы ввиду небольшой длины водотока, которая помещается в восьми листах (20 000 км²) высокого пространственного разрешения.

Упомянув другие ЦММ и ЦМР, используемые в настоящей работе, можно сделать вывод о том, что для выделения водотока они, как и ArcticDEM в среднем пространственном разрешении, не требуют высокой производительности ПК, даже при обработке больших по площади территорий.

Дополнительно рассматривалась возможность выделения водотока при помощи облачной платформы Google Earth Engine [Gorelick et al., 2017]. Такой подход представлялся рациональным при учете обработки данных такого объема. GEE сочетает в себе наборы открытых данных, а также алгоритмы и методы, которые можно использовать для их обработки посредством пользовательского интерфейса на языке программирования JavaScript через редактор программного кода или Python в другой среде разработки, к примеру, в Google Colab (Colaboratory). Однако при проведении исследования было выяснено, что GEE на настоящий момент не поддерживает операции с многоитерационными вычислениями. К таким вычислениям как раз относятся алгоритмы определения направления и суммарного стока, поэтому произвести выделение водотоков по ЦММ на этой платформе не представляется возможным.

Результаты выделения водотоков

На рис. 5 показаны участки, соответствующие максимальному отклонению водотоков, полученных по различным ЦММ и ЦМР, от эталонного объекта. Как можно заметить, для участка р. Северной Двины наиболее некорректные участки расположены хаотично по всему протяжению, а для р. Мойеро и р. Момы они находятся преимущественно в верхнем течении, т. е. все исследуемые ЦММ и ЦМР ошибочно выделяли водоток именно в этих местах. Верховья р. Мойеро являются заболоченными территориями, а на р. Моме в верхнем и среднем течении периодически возникают ледовые явления — наледи, кроме постоянной Большой Момской наледи. Два этих фактора отрицательно влияют на алгоритм выделения водотока независимо от типа рельефа прилегающих ландшафтов.

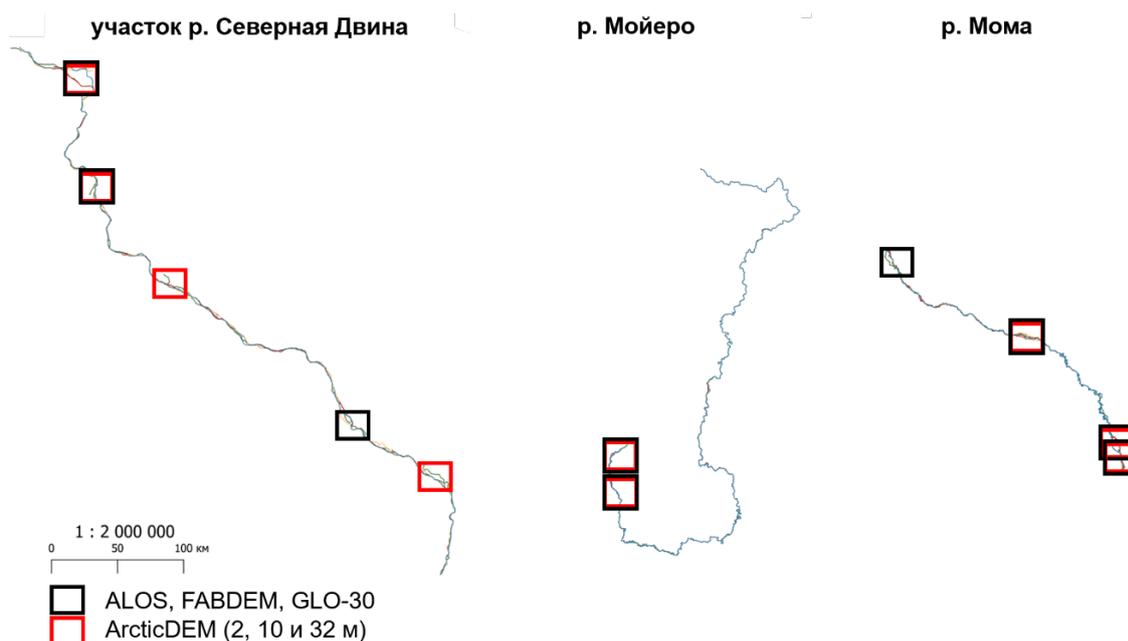


Рис. 5. Участки максимального отклонения водотоков от эталонного объекта
Fig. 5. Areas of maximum deviation of waterlines from the reference object

Результирующие модели водотоков не отличаются высокой точностью, наблюдаются множественные геометрические и топологические ошибки [Polidori, Hage, 2020], даже при выделении по ЦМР или по ЦММ высокого пространственного разрешения (на примере р. Момы). При бифуркации река разделяется на два рукава, соответственно, по ЦММ не всегда верно определен наиболее водный из них, который принимается за основное русло реки, причем второй рукав обычно не идентифицируется. Для всех моделей характерны ложные завороты, нереалистичные (угловатые) формы, смещение русла реки на сушу. Участок р. Северной Двины, смоделированный по ЦММ среднего пространственного разрешения ArcticDEM (10 и 32 м) и GLO-30 характеризуется нарушением целостности потока (невозможная топология). Это связано с тем, что уклон реки очень мал ввиду равнинного характера ее течения. Вероятно, в некоторых местах разница значений высот настолько мала, что алгоритм не может правильно определить направление стока. При визуальном осмотре для р. Мойеро и р. Момы наиболее некорректной выступает модель, полученная по ЦММ ALOS.

Неудовлетворительные результаты выделения водотока по ЦМР и ЦММ как высокого, так и среднего пространственного разрешения требуют необходимости проведения оценки точности исходного растрового слоя и полученной векторной гидрографической основы.

Оценка корректности исходных данных о рельефе и векторной гидрографической основы

Вычисление длин полученных моделей — непоказательная оценка при частичном отсутствии данных. Сравнение длины полученных объектов без учета нецельных моделей, а также моделей, которые не были извлечены вовсе, не позволит установить зависимости в оценке корректности выделения водотока.

В настоящей работе было проанализировано лишь три участка (эталонные объекты) и шесть вариантов ЦММ и ЦМР, что в совокупности представляет собой двадцать одну модель. Автоматизированный процесс выделения водотоков, визуальный анализ каждой

модели (визуальное программирование ModelBuilder), их сравнение между собой и представление результатов в виде картосхемы являются трудоемкими и времязатратными манипуляциями (рис. 6).

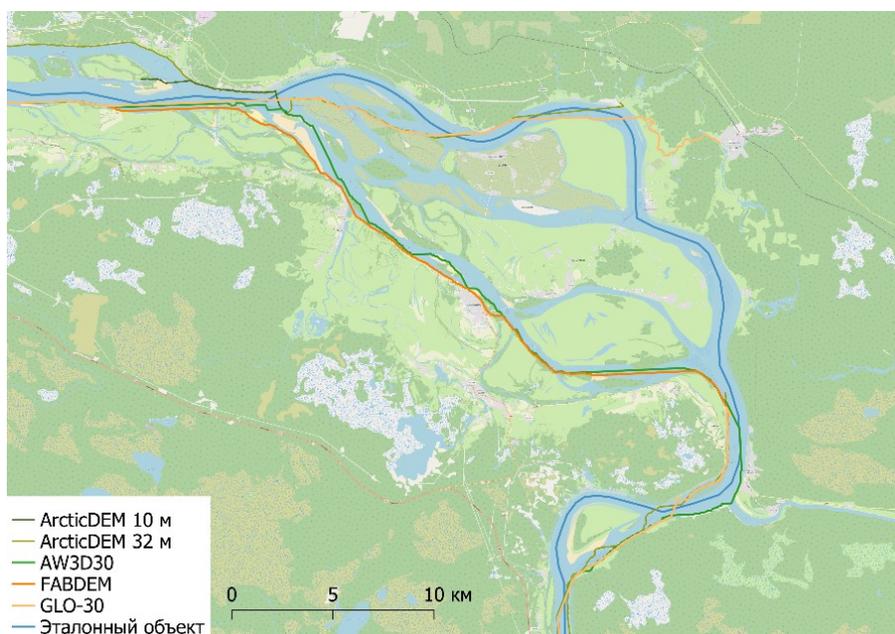


Рис. 6. Пример представления участка реки при визуальном анализе
Fig. 6. Example of river section representation in visual analysis

Продольные профили различных ЦММ и ЦМР соотнесены для выявления закономерностей в данных о высотах на примере эталонного участка р. Северной Двины, состоящего из 1 327 вершин (рис. 7). Векторные модели рек, полученных по разным ЦММ и ЦМР, не подходят для такого рода анализа, поскольку их вершины расположены в разных местах по длине реки.

Исходные данные ЦММ ALOS имеют большое количество артефактов. Алгоритм устранения замкнутых понижений, реализованный в ArcGIS, позволит устранить лишь отрицательные значения выбросов, а в местах положительных ложных значений будут формироваться предполагаемые некорректные участки результирующей векторной гидрографической основы, которые можно идентифицировать по продольному профилю. ЦМР FABDEM отличается от ЦММ GLO-30 лишь в некоторых местах, где наблюдается небольшое занижение выбросов.

Профили высот ArcticDEM практически идентичны (рис. 8), за исключением некоторых участков на модели 32 м, что логично, поскольку с уменьшением пространственного разрешения происходит ухудшение качества данных. Наблюдается проблема искусственно выровненных значений высот, которые занижены и не соответствуют реальным данным о рельефе территории, в отличие от ЦММ и ЦМР на рис. 6. Это также означает, что для ArcticDEM нет необходимости использовать инструмент устранения локальных понижений (Fill), поскольку отрицательные значения отсутствуют. Выбросы свидетельствуют об отсутствии данных в конкретном месте по ходу продольного профиля. Таким образом, не имея возможности выделить водотоки по ЦММ высокого пространственного разрешения ввиду ограничений производительности ПК, есть возможность оценить качество моделей среднего пространственного разрешения (10 и 32 м). Лучшие результаты выделения водотока показывает модель 10 м пространственного разрешения.



Рис. 7. Продольный профиль местности по исходным данным ALOS, GLO-30 и FABDEM
Fig. 7. Longitudinal profile of the terrain based on ALOS, GLO-30 and FABDEM data



Рис. 8. Продольный профиль местности по исходным данным ArcticDEM
Fig. 8. Longitudinal profile of the terrain based on the original ArcticDEM data

ВЫВОДЫ

Выделение водотоков с учетом рельефа местности по цифровой модели местности высокого пространственного разрешения ArcticDEM и сравнение моделей с другими данными о высотах позволяют сделать следующие выводы:

- описанные факторы, влияющие на производительность ПК и выявленная зависимость времени расчета промежуточных слоев для выделения водотока от пространственного разрешения ЦММ ArcticDEM позволяют оценить возможности конкретного ПК для осуществления подобных расчетов;
- экспериментально установлено, что вычислительные ресурсы среднестатистического ПК не позволяют обрабатывать данные такой подробности; вероятно, необходимо сотрудничать с ресурсными центрами;
- выделение водотока по ЦММ высокого пространственного разрешения не может гарантировать увеличение корректности моделируемого объекта (на примере р. Момы);
- рельеф территории определяет общую успешность работы алгоритма (чем он контрастнее, тем лучше работает алгоритм). Присутствие заболоченности и ледовых явлений на реках отрицательно влияют на работу алгоритма даже в горных и плоскогорных местностях;
- значение уклона водотока может выступать ориентиром общей успешности работы алгоритма при моделировании различных классов рек (на примере равнинной р. Северной Двины);
- построенные профили местности являются ценным инструментом оценки исходной модели высот, а также позволяют идентифицировать предполагаемые некорректные участки векторной гидрографической основы путем анализа артефактов в распределении значений высот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лурье И. К.* Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М.: КДУ, 2008. 424 с.
- Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б.* Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т. 17. № 7. С. 117–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.
- Пьянков С. В., Шихов А. Н.* Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. Пермь: ПГНИУ, 2017. 148 с.
- Решин Н. А., Ковалева М. В., Гайдучова Е. В.* Оценка морфометрических характеристик водосборов рек ГИС-системами на примере АЗРФ. Региональная информатика и информационная безопасность, 2020. № 9. С. 216–217.
- Энтин А. Л.* Методы повышения достоверности цифровых моделей рельефа для гидрологического моделирования и картографирования. Диссертация на соискание ... кандидата географических наук. М: МГУ имени М. В. Ломоносова, 2019. 106 с.
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- Jenson S., Domingue J.* 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.

Lu X., Yang K., Lu Y., Gleason C., Smith L., Li M. Small Arctic rivers mapped from Sentinel-2 satellite imagery and ArcticDEM. *Journal of Hydrology*, 2020. V. 584. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124689.

O'Callaghan J., Mark D. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*, 1984. V. 208. No. 3. P. 323–344.

REFERENCES

Entin A. L. Methods to improve the reliability of digital elevation models for hydrological modeling and mapping. Dissertation for the ... of PhD in geography. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2019. 106 p. (in Russian).

Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

Jenson S., Domingue J. 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.

Lu X., Yang K., Lu Y., Gleason C., Smith L., Li M. Small Arctic rivers mapped from Sentinel-2 satellite imagery and ArcticDEM. *Journal of Hydrology*, 2020. V. 584. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124689.

Lurie I. K. Geoinformation mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of space images. Moscow: KDU, 2008. 424 p. (in Russian).

O'Callaghan J., Mark D. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*, 1984. V. 208. No. 3. P. 323–344.

Polyakova E. V., Kutinov Y. G., Mineev A. L., Chistova Z. B. Analysis of the possibility of application of digital elevation models ASTER GDEM v2 and ArcticDEM for studies of the Arctic territories of Russia. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2020. V. 17. No. 7. P. 117–127 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.

Pyankov S. V., Shikhov A. N. Geoinformational support of modeling of hydrological processes and phenomena. Perm: Publishing House of Perm State University, 2017. 148 p. (in Russian).

Reshin N. A., Kovaleva M. V., Gaidukova E. V. Evolution of morphometric characteristics of river catchments by GIS-systems on the example of the Russian Arctic. *Regional Informatics and Information Security*, 2020. No. 9. P. 216–217 (in Russian).