

ОЦЕНКА ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ВОДОСБОРОВ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГИС НА ПРИМЕРЕ г. МИНСКА

Е. П. ОВЧАРОВА¹⁾, С. В. АЛИСИЕВИЧ¹⁾, Н. В. КОВАЛЬЧИК²⁾

¹⁾Институт природопользования НАН Беларусь, ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. С использованием цифровой модели рельефа и инструментов гидрологического моделирования Arc Hydro в среде ArcGIS Desktop (версия 10.7) выделены 73 локальных водосбора в современных границах г. Минска. На основе полученной картосхемы выполнено моделирование исторической гидрографической сети и границ существующих в настоящее время естественных водосборов на территории города. С учетом данных по формированию коллекторной сети дождевой канализации для отвода поверхностного стока определены участки трансформации и скорректированы границы водосборов. На территории г. Минска выявлены четыре направления трансформации водосборов. Первое направление связано с исчезновением естественного водотока и переходом функции по отводу поверхностного стока к коллекторной сети (доля площади таких водосборов составляет 18,4 %). Второе направление сопряжено с фрагментацией водосборов центральной части города вследствие создания сети мелких коллекторов с самостоятельными выпусками в водоток (18,9 % от площади города). Третье направление обусловлено укрупнением водосборов магистральных коллекторов по сравнению с водосборами исходных водотоков за счет присоединения части стока смежных водосборов. Четвертое направление связано с уменьшением площади водосборов магистральных коллекторов относительно площади водосборов исходных водотоков в результате фрагментации и отведения части стока в другие коллекторы. Доля территорий города, изменивших водосборную принадлежность, составляет 17,9 % (59,3 км²).

Ключевые слова: ГИС-технологии; гидрологическое моделирование; урбанизированная территория; естественный водосбор; трансформация пространственной структуры.

Образец цитирования:

Овчарова ЕП, Алисевич СВ, Ковалчик НВ. Оценка трансформации пространственной структуры водосборов урбанизированной территории с применением гидрологического моделирования в ГИС на примере г. Минска. Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. 2025;1:24–34.

EDN: OSRCYE

For citation:

Aucharova AP, Alisievich SV, Kavalchik NV. Assessment of the spatial structure transformation of catchments on the urban territory using hydrological modelling in GIS on the example of Minsk. Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology. 2025;1:24–34. Russian.

EDN: OSRCYE

Авторы:

Елена Петровна Овчарова – кандидат географических наук; старший научный сотрудник лаборатории оптимизации геосистем.

Святослав Владимирович Алисевич – младший научный сотрудник лаборатории оптимизации геосистем.

Надежда Владимировна Ковалчик – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Alena P. Aucharova, PhD (geography); senior researcher at the laboratory of geosystems optimisation.

geosystem1@rambler.ru

Svyatoslav V. Alisievich, junior researcher at the laboratory of geosystems optimisation.

sviatolv@gmail.com

Nadzeya V. Kavalchik, PhD (geography), docent; associate professor at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.

kovalchiknv@gmail.com

ASSESSMENT OF THE SPATIAL STRUCTURE TRANSFORMATION OF CATCHMENTS ON THE URBAN TERRITORY USING HYDROLOGICAL MODELLING IN GIS ON THE EXAMPLE OF MINSK

A. P. AUCHAROVA^a, S. V. ALISIEVICH^a, N. V. KAVALCHYK^b

^a*Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
10 F. Skaryny Street, Minsk 220076, Belarus*

^b*Belarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

Corresponding author: A. P. Aucharova (geosystem1@rambler.ru)

Abstract. Using a digital elevation model and Arc Hydro hydrological modelling tools in the *ArcGIS Desktop* (version 10.7) environment, 73 local catchments within the modern boundaries of Minsk were identified. Based on the resulting schematic map, the historical hydrographic network and boundaries of currently existing natural catchments in the city were modelled. Taking into account the data on the formation of rainwater drainage network for urban runoff removal, transformation areas were identified and the catchments boundaries were adjusted. On the territory of Minsk, four directions of catchments transformation were identified. The first direction is associated with the disappearance of the natural catchments and the transfer of the urban runoff draining function to the rainwater drainage network (the share of the area of such catchments is 18.4 %). The second direction is driven by fragmentation of catchments in the city central part due to creation of small rainwater drainage network with independent discharges into the water stream (18.9 % of the city area). The third direction is caused by the catchments enlargement of the main collectors of rainwater drainage network in comparison with the river natural catchments due to the addition of part of the neighbour catchments. The fourth direction is associated with the catchment reduction of the main collectors relative to the river natural catchments as a result of fragmentation and partial drainage of urban runoff to other collectors. The part of city area that have changed their catchment is 17.9 % (59.3 km²).

Keywords: GIS technologies; hydrological modelling; urban area; natural catchment; spatial structure transformation.

Введение

В современных условиях урбанизированные территории подвергаются значительной трансформации из-за застройки и формирования инфраструктуры, обеспечивающей жизнь городов [1–3]. В результате освоения территорий естественная гидрографическая сеть редко остается в исходном состоянии, а водные объекты приобретают природно-антропогенные либо природно-техногенные черты. Как правило, происходит сокращение длины рек, дренирующих территорию города, формируются техногенные водосборы сети дождевой канализации, реки заключаются в коллекторы и пересыхают, в том числе из-за эксплуатации водозаборов подземных вод [4; 5].

За последние 50–60 лет структура водных объектов г. Минска существенно изменилась. Если ранее реками и русловыми водоемами было занято около 76 % водопокрытой площади, отдельными водоемами – 10 %, каналами и открытыми коллекторами – 7 %, мелиоративными системами и ручьями – 4 и 3 % соответственно, то в настоящее время на реки и русловые водоемы приходится 72 %, на отдельные водоемы – 21 %, на каналы и открытые коллекторы (включая Слепянскую водную систему) – не более 7 % водопокрытой площади [6].

Наибольшей трансформации естественные водные объекты г. Минска подверглись в 1968–1976 гг. при строительстве Вилейско-Минской водной системы, когда были созданы ряд водохранилищ (Дрозды, Комсомольское озеро и др.) и водообмен р. Свисочи возрос в пять раз. В результате площадь, занимаемая водными объектами, увеличилась примерно на 4,0 км². Следующее существенное увеличение водопокрытой площади (на 1,1 км²) наблюдалось в 1982–1985 гг. при строительстве Слепянской водной системы и водохранилищ Лошица и Цнянское. При этом произошло сокращение водотоков в естественном состоянии, исчезли реки Дражня, Немига, Переспа, ручьи Грушевский, Серебрянка и др. (площадь зеркала водотоков уменьшилась примерно на 1,5 км²) [5].

В настоящее время общая площадь водного зеркала составляет 8,3 км², что на 5,0 км² больше, чем в 1950-х гг., а водные объекты г. Минска представлены:

- водотоками (1,8 км²);
- системообразующими водоемами, такими как водохранилища Чижовское, Цнянское, Дрозды, Лошица, пруд Лебяжий, Комсомольское озеро, водоем ТЭЦ-2 (5,97 км²);

- Слепянской водной системой без вдхр. Цнянское ($0,23 \text{ км}^2$);
- малыми водоемами, в число которых входят остаточные водоемы от пересохших рек и ручьев ($0,1 \text{ км}^2$), бывшие копани и искусственно созданные водоемы ($0,2 \text{ км}^2$).

Основной этап строительства сети магистральных коллекторов дождевой канализации для отвода поверхностного стока с территории города пришелся на период 1960–90-х гг. Так, в 1977 г. было закончено строительство коллектора «Запад», в 1980 г. – коллекторов «Юго-Запад» и «Комаровский», в 1990 г. – коллектора «Дражня», в 1991 г. – коллектора «Центр», в 1992 г. – коллектора «Слепянка». В 2010–2011 гг. проведена реконструкция коллектора «Центр», а в 2014 г. сдан в эксплуатацию магистральный коллектор «Немига». Начиная с 2000-х гг. ведется проектирование, строительство и реконструкция сооружений по очистке поверхностного стока города, в том числе для сети мелких коллекторов [7]. Ввиду перечисленных факторов оценка современной пространственной структуры водосборов на территории г. Минска и ее изменения под влиянием антропогенной нагрузки представляет собой актуальную задачу.

Работа выполнена с применением ГИС-технологий, которые являются важным современным инструментом для исследования гидрологических процессов. Спектр гидрологических приложений ГИС довольно широк: они используются для обработки пространственных данных, моделирования, прогнозирования и поддержки принятия решений [8]. Гидрологическое моделирование в ГИС применяется для решения таких задач, как расчет русловых и бассейновых морфометрических характеристик [9], прогнозирование паводков и половодий на реках [10], определение зон возможного подтопления [11], устранение неточностей гидрологического районирования [12] и др. При моделировании гидрологических процессов в условиях города наряду с показателями проницаемости и запечатанности почвенного покрова следует учитывать обеспеченность территории сетями дождевой канализации, от которой существенно зависит скорость отвода поверхностного стока и его добегания до принимающего водотока [13]. Так, ранее анализ пространственно-временных изменений естественной и искусственной дренажных сетей был выполнен для городов Великого Новгорода [14] и Саратова [15].

При изучении антропогенной преобразованности водосборов на территории г. Минска в работе [16] исходное состояние гидрографической сети воссоздано по картам и снимкам 1930–40-х гг.¹ В публикации [17] оно восстановлено с использованием инструментов ГИС-моделирования. В этом случае основой моделирования дренажной сети города послужили данные по гипсометрии территории, полученные путем натурной съемки и представляющие собой набор основных горизонталей, проведенных через 1,0 и 0,5 м, и дополнительных горизонталей, проведенных через 0,5 и 0,25 м соответственно. Построение бассейнов реализовано в программе *Global Mapper* (версия 15) с использованием инструмента *generate watershed* (создать водораздел).

Целью данного исследования было выявить направления и уровень трансформации естественных водосборов в результате формирования на территории г. Минска системы дождевой канализации для отвода поверхностного стока. Для этого выполнялось ГИС-моделирование границ водосборов естественной гидрографической сети, далее проводилась корректировка границ водосборов с учетом современной ситуации с отводом поверхностного стока магистральными и более мелкими коллекторами дождевой канализации. Информация о сети дождевой канализации на территории г. Минска взята из работы [4] и актуализирована по фондовым материалам унитарного предприятия «Минскинжпроект».

Материалы и методы исследования

Работа выполнялась в два этапа.

Этап 1: выделение локальных водосборов и естественной гидрографической сети г. Минска с помощью инструментов гидрологического моделирования *Arc Hydro*² в среде *ArcGIS Desktop* (версия 10.7). В качестве исходных данных использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) территории города с пространственным разрешением 10 м (рис. 1, а). Определение границ водосборов проводилось в несколько шагов.

Шаг 1: обработка исходной ЦМР в целях создания гидрологически корректной ЦМР. Чтобы максимально приблизить модель к действительной поверхности рельефа, были устранены погрешности и неточности в значениях ячеек раstra путем нивелирования локальных понижений и повышений (некорректных областей внутреннего стока) с помощью инструмента *fill sinks* (заполнение понижений). В процессе заполнения локальных понижений инструмент определяет ячейки раstra исходной

¹ Аэрофотоснимки немецких спутников Второй мировой войны, 28.05.1944 и 15.05.1943 [Электронный ресурс]. URL: <http://warfly.ru/?lat=53.895033&lon=27.569160&z=12> (дата обращения: 12.06.2019); Минск и окрестности [Карты] / сост. Душка ; ред. Самотей. 1 : 50 000, 1 км в 2 см. [Б. м.] : [Б. и.], 1933. 1 к. : цв.

² Arc Hydro: GIS for water resources [Electronic resource] / ed. D. R. Maidment. 3rd ed. Redlands : Esri Press, 2022. XIV, 203 p. : ill., maps. URL: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/files/pdfs/library/fliers/pdfs/archydro.pdf> (date of access: 04.10.2024).

ЦМР, которые имеют более низкие численные значения, чем окружающие их ячейки, и часто являются ошибками, возникающими из-за разрешения набора данных³. Затем он корректирует значения этих ячеек для обеспечения более точного выделения водосборов и водотоков. Если не заполнить локальные понижения, в последующем дренажная сеть может иметь разрывы. В большинстве случаев, когда понижения являются артефактами ЦМР, такая обработка верна, однако иногда устраняются и значимые понижения, что тоже может повлиять на дальнейшее моделирование. Инструмент был использован также для удаления локальных повышений – ячеек растра с высотой больше ожидаемой, учитывая высоту окружающей поверхности. В результате обработки получена гидрологически корректная ЦМР (*hydro DEM*) территории (рис. 1, б).

Шаг 2: определение направления стока в каждой ячейке грид-модели путем анализа углов и экспозиций склонов с помощью инструмента *flow direction* (направление потока). Инструмент принимает в качестве входных данных гидрологически корректную ЦМР (*hydro DEM*) и вычисляет соответствующий растр направления стока (*flow direction grid*) (рис. 1, в). В процессе вычисления сканируется высота каждой ячейки для определения направления самого крутого спуска и присваиваются численные значения выходному растру, указывающие, в какую соседнюю ячейку будет поступать вода. Всего выделяется восемь направлений спуска, в зависимости от которых каждой ячейке присваивается численное значение: восточное (ему соответствует значение 1), юго-восточное (2), южное (4), юго-западное (8), западное (16), северо-западное (32), северное (64), северо-восточное (128).

Шаг 3: вычисление суммарного стока (количество всех ячеек, чей сток попадает в ячейку, лежащую ниже по склону) с помощью инструмента *flow accumulation* (накопление стока). Инструмент принимает в качестве входных данных модель направления стока (*flow direction grid*) и вычисляет модель накопления стока (*flow accumulation grid*), которая содержит суммарное количество ячеек вверх по течению для каждой ячейки во входном растре. Ячейки с самым большим значением суммарного стока образуют линии, являющиеся основой для выделения в дальнейшем сети водотоков. Ячейки с суммарным стоком, принимающим значение 0, – это территориальные «пики» (возвышения), с помощью которых визуализируются линии водоразделов.

Шаг 4: определение сети водотоков с помощью инструмента *stream definition* (определение водотоков). Инструмент принимает в качестве входных данных модель накопления стока (*flow accumulation grid*) и выделяет сеть постоянных водотоков (*stream grid*) для заданного порога точности. Этот порог определяется либо количеством ячеек растра (по умолчанию 1 % от максимального накопления стока), либо минимальной площадью водосбора. Таким образом задается показатель суммарного стока, при котором поток будет считаться водотоком. В ходе данного исследования было принято значение порога по умолчанию.

Шаг 5: выделение звеньев каждого водотока на основе полученной сети водотоков с использованием инструмента *stream segmentation* (сегментация водотоков). Инструмент создает грид-модель сегментов, имеющих уникальную идентификацию согласно их порядку: сегмент водотока классифицируется как верхний сегмент (верхняя часть водотока) либо как сегмент, соединяющий два сегмента. Всем ячейкам растра, относящимся к определенному сегменту, присваивается уникальный код, характерный для этого сегмента. В результате был получен растр сегментации потоков (*stream link grid*).

Шаг 6: создание грид-модели, в которой каждая ячейка содержит грид-код (*grid code*), указывающий, к какому водосбору она относится, с использованием инструмента *catchment grid delineation* (очертание водосборов). Грид-код соответствует тому значению, которое имеет сегмент водотока, осушающий водосборную область, определенную во входном растре (*stream link grid*). На выходе была получена грид-модель водосборов (*catchment grid*) (рис. 1, г).

Шаг 7: автоматизированное выделение границ водосборов с использованием инструмента *catchment polygon processing* (обработка полигонов водосборов). Инструмент принимает в качестве входных данных грид-модель водосборов (*catchment grid*) и конвертирует ее в полигональный слой (*catchment*) (рис. 1, д). Соседние ячейки исходного растра водосборов, имеющие одинаковый код, объединяются в единую область, граница которой векторизуется.

Далее выполнялась ручная корректировка границ водосборов. Из полученного векторного слоя водосборов вырезались крупные площадные водные объекты – водохранилища Чижовское, Дрозды, Куровщина, пруд Лебяжий. Также удалялись полигоны водосборов, заходящих на территорию г. Минска лишь незначительной частью своей площади. Кроме того, уточнялись некоторые границы водосборов, проходящие по речным долинам и определенные в результате применения функции *fill sinks* неестественно прямой линией. В итоге на территории г. Минска были выделены 73 естественных локальных водосбора (рис. 1, е).

³How fill works // Esri : website. URL: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fill-works.htm> (date of access: 04.10.2024).

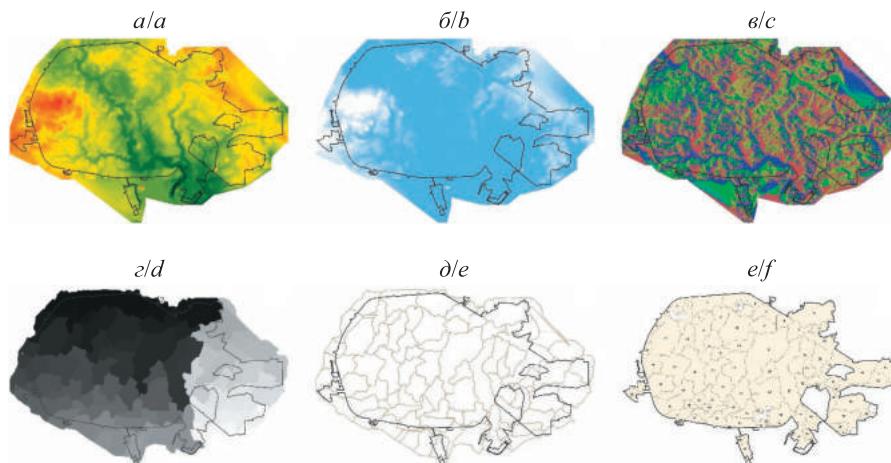


Рис. 1. Этапы выделения локальных водосборов на территории г. Минска инструментами гидрологического моделирования

Fig. 1. Stages of local catchments identification on the territory of Minsk using hydrological modelling tools

Этап 2: моделирование естественной гидрографической сети г. Минска и агрегация полученных локальных водосборов в водосборы водотоков, ранее протекавших по территории города, оцифровка современной коллекторной сети дождевой канализации с выпусками в водотоки г. Минска.

В завершение работы была проведена корректировка границ водосборов естественной гидрографической сети города с учетом современной ситуации с отводом поверхностного стока магистральными и более мелкими коллекторами дождевой канализации.

Результаты и их обсуждение

В современных границах г. Минска выделены естественные водосборы 15 водотоков: Грушевского, Дививелки (Тарасовки), Дражни (Словсти), Крупицы (Крупки), Лошицы, Мышки, Немиги, Переспы, Свислочи, Сеницы, Серебрянки, Слепянки (Слепни), Слоуста, Тростянки и Цны (рис. 2). Часть указанных водотоков существуют в настоящее время, некоторые исчезли (например, ручьи Грушевский и Серебрянка) или были заключены в подземные коллекторы (например, р. Немига), а некоторые преобразованы в коллекторы дождевой канализации (реки Переспа, Дражня и др.).

Характеристики водосборов исторической гидрографической сети (до создания водохранилищ и сети коллекторов) приведены в табл. 1. Так, горизонтальная расчлененность водосборов на территории г. Минска колебалась в пределах 1,9–2,4 км/км². Минимальные значения были характерны для водосборов рек Немиги и Сеницы, максимальные – для водосборов рек Дививелки, Лошицы, Свислочи и Слепянки.

Наименьшей площадью водосбора в границах города отличались следующие малые водотоки, не существующие в настоящее время: Крупица, Серебрянка, Немига и Дививелка. Другие не существующие в настоящее время водотоки – Грушевский, Переспа и Дражня – имели более крупные водосборы, объединявшие 1–2 локальных водосбора. Далее по возрастанию площади водосбора следовали водотоки Лошица и Мышка, которые включали 6 и 4 локальных водосбора соответственно (см. табл. 1).

Самыми крупными по площади водосборами исторической гидрографической сети являются водосборы рек Тростянки, Слепянки и Свислочи (см. табл. 1). В отдельную группу можно выделить водотоки Сеницу, Слоуст и Цну, которые протекают за границами или по окраинам города, вследствие чего в пределах городской черты расположена лишь небольшая часть их водосборов.

В настоящее время система дождевой канализации г. Минска включает 7 крупных магистральных коллекторов (объем сброса более 1000 тыс. м³ в год): «Комаровский», «Центр», «Немига», «Запад», «Юго-Запад», «Дражня» и «Слепянка» (рис. 3). Коллекторы «Комаровский», «Центр» и «Немига» имеют самостоятельные выпуски в р. Свислочь после очистных сооружений в центральной части города, коллекторы «Дражня» и «Слепянка» – общий выпуск в р. Свислочь после пруда-регулятора в районе ул. Инженерной, коллекторы «Запад» и «Юго-Запад» – общий выпуск в р. Лошицу после очистных сооружений в районе ул. Семашко. На долю этих 5 выпусков приходится 85,7 % поверхностного стока, формирующегося в пределах города и поступающего в водотоки через систему дождевой канализации. Еще 9,5 % поверхностного стока приходится на 15 выпусков средних коллекторов (объем сброса 100–1000 тыс. м³ в год). На остальные 80 выпусков мелких коллекторов (объем сброса менее 100 тыс. м³ в год) приходится только 4,8 % поверхностного стока.

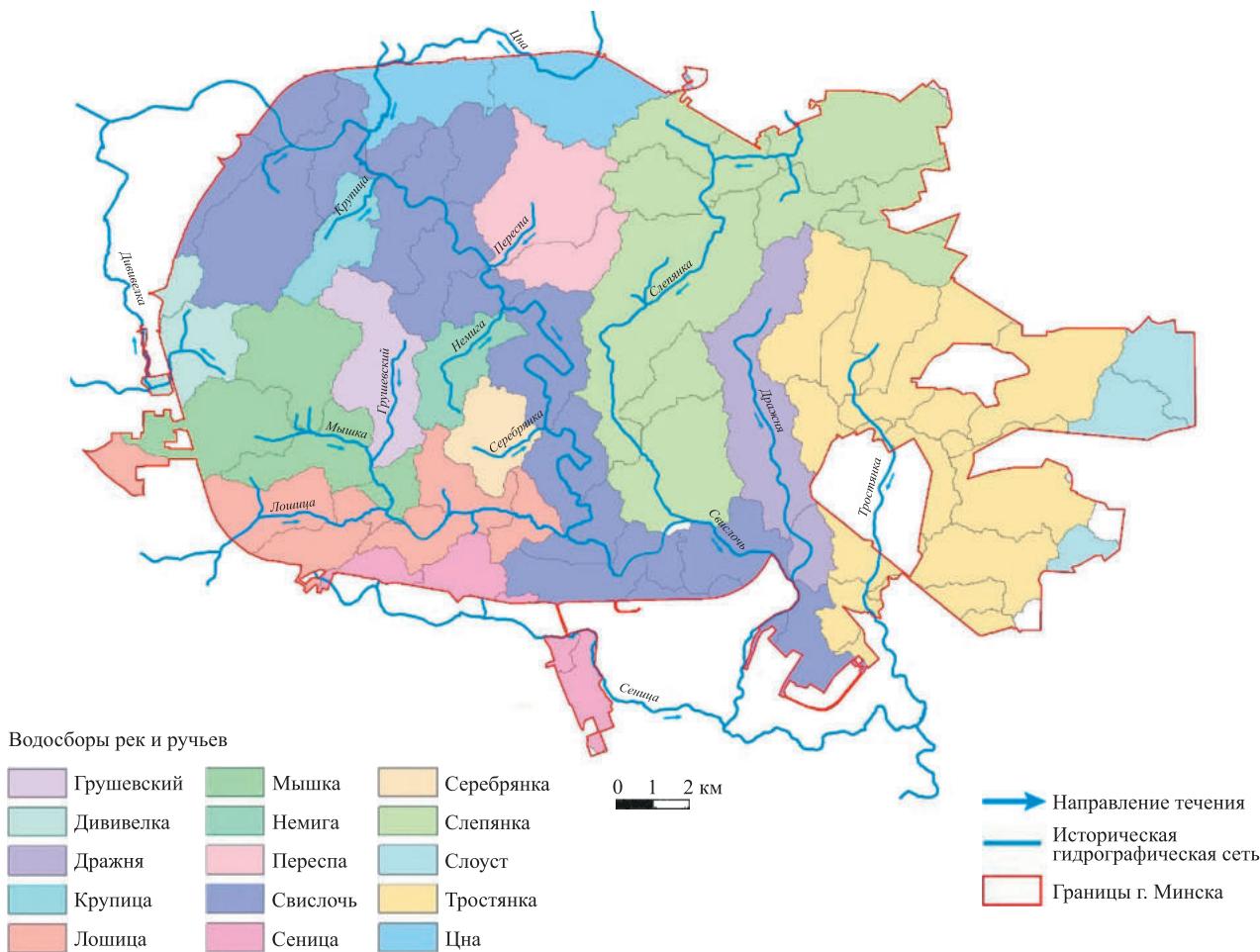


Рис. 2. Картосхема водосборов исторической гидрографической сети на территории г. Минска
Fig. 2. Schematic map of catchments of the historical hydrographic network on the territory of Minsk

Таблица 1

Характеристика водосборов естественной гидрографической сети
в современных границах г. Минска

Table 1

Characteristics of catchments of the natural hydrographic network
within the modern borders of Minsk

Водоток	Площадь водосбора, км ²	Количество локальных водосборов, шт.	Средняя площадь локального водосбора, км ²	Длина естественной дренажной сети, км	Горизонтальная расчлененность, км/км ²
Грушевский	9,14	1	9,1	18,94	2,1
Дививелка	6,46	2	3,2	15,74	2,4
Дражня	15,58	2	7,8	34,99	2,2
Круница	4,80	1	4,8	9,95	2,1
Лошица	21,41	6	3,6	51,43	2,4
Мышка	23,32	4	5,8	52,72	2,3
Немига	5,35	1	5,4	10,23	1,9
Переспа	14,25	2	7,1	33,02	2,3
Свислочь	71,25	19	3,8	172,91	2,4
Сеница	8,20	4	2,0	15,63	1,9

Окончание табл. 1
 Ending of the table 1

Водоток	Площадь водосбора, км ²	Количество локальных водосборов, шт.	Средняя площадь локального водосбора, км ²	Длина естественной дренажной сети, км	Горизонтальная расчлененность, км/км ²
Серебрянка	5,26	1	5,3	12,26	2,3
Слепянка	64,78	10	6,5	153,87	2,4
Слоуст	9,30	3	3,1	18,59	2,0
Тростянка	57,36	15	3,8	120,54	2,1
Цна	14,25	2	7,1	29,84	2,1

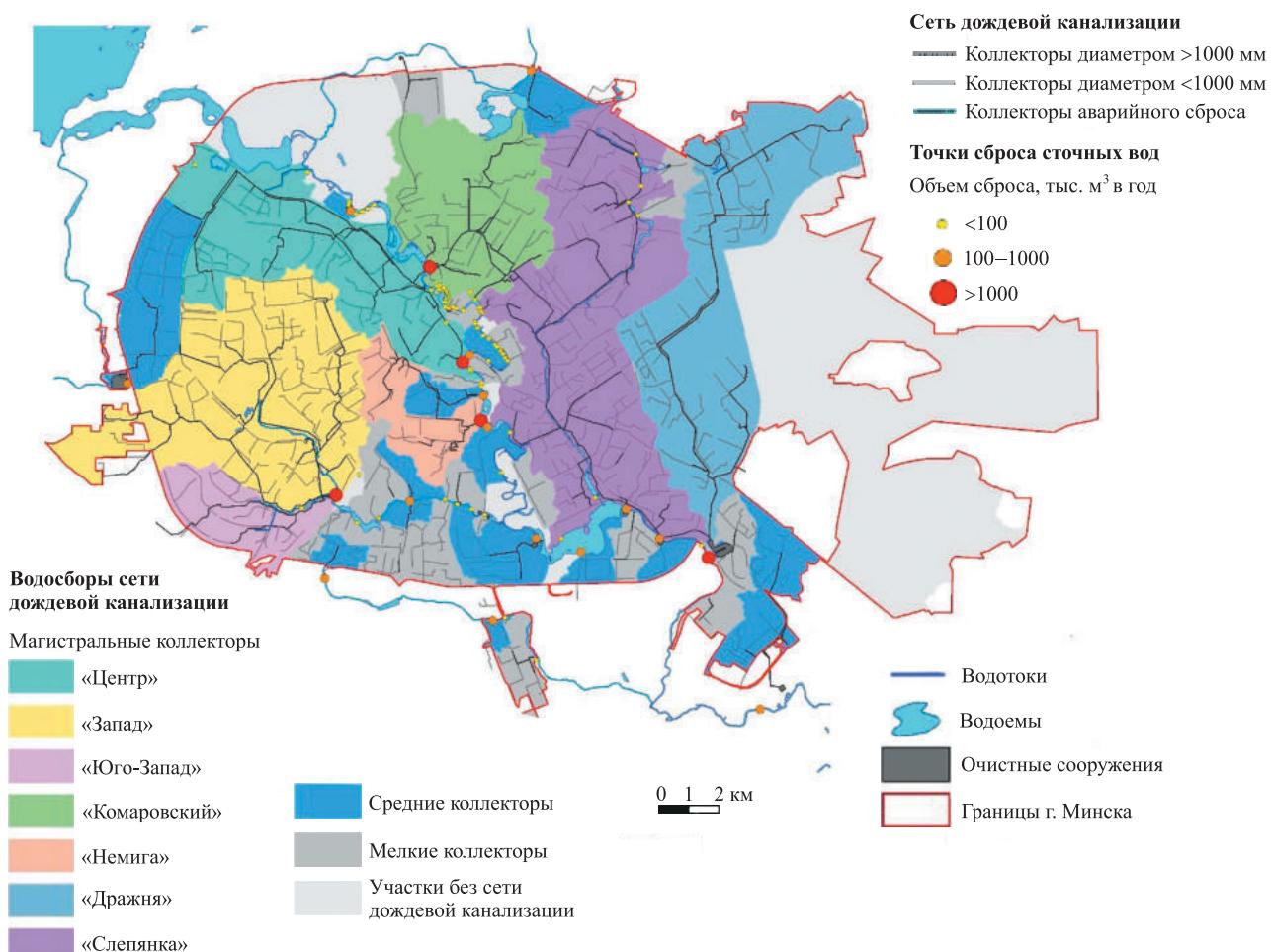


Рис. 3. Картосхема системы коллекторов дождевой канализации г. Минска для отвода поверхностного стока
 Fig. 3. Schematic map of the Minsk storm sewer systems for urban runoff drainage

Данные о площади водосборов современной сети коллекторов дождевой канализации на территории г. Минска приведены в табл. 2.

Сформированная на территории г. Минска система дождевой канализации для отвода поверхностного стока существенно трансформировала водосборную сеть водотоков города. Так, в настоящее время доля участков городской территории, обеспеченных сетями дождевой канализации, составляет 75,0 %. Из них 55,7 % обслуживается магистральными коллекторами, 10,5 % – средними, 8,8 % – мелкими коллекторами дождевой канализации.

В целом существующую на территории г. Минска коллекторную сеть с выпусками в р. Свислочь и ее притоки можно считать новыми техногенными притоками, возникшими в результате урбанизации водосбора. При этом, как правило, магистральные коллекторы в той или иной мере наследуют водосборы естественной речной сети.

Таблица 2

Площадь водосборов системы коллекторов дождевой канализации г. Минска для отвода поверхностного стока

Table 2

Catchment's square of the Minsk storm sewer systems for urban runoff drainage

Водосбор	Площадь, км ²
Вся канализированная территория	248,1
Водосборы магистральных коллекторов	184,4
В том числе:	
водосбор коллектора «Центр»	26,5
водосбор коллектора «Запад»	38,0
водосбор коллектора «Юго-Запад»	8,3
водосбор коллектора «Комаровский»	20,9
водосбор коллектора «Немига»	7,3
водосбор коллектора «Дражня»	36,7
водосбор коллектора «Слепянка»	46,7
Водосборы средних коллекторов	34,7
Водосборы мелких коллекторов	29,0
Водосборы без сети дождевой канализации	82,7

Проведенный анализ данных показал, что на территории г. Минска в настоящее время можно выделить следующие направления трансформации пространственной структуры водосборов.

1. Формирование водосборов, где функцию по отводу поверхностного стока выполняет коллекторная сеть ввиду полного исчезновения естественных водотоков. Данная ситуация наблюдается для исчезнувших или канализированных водотоков (Грушевский, Дививелка, Дражня, Крупица, Немига, Серебрянка, Переспа). Доля площади таких водосборов на территории города составляет 18,4 % (рис. 4).

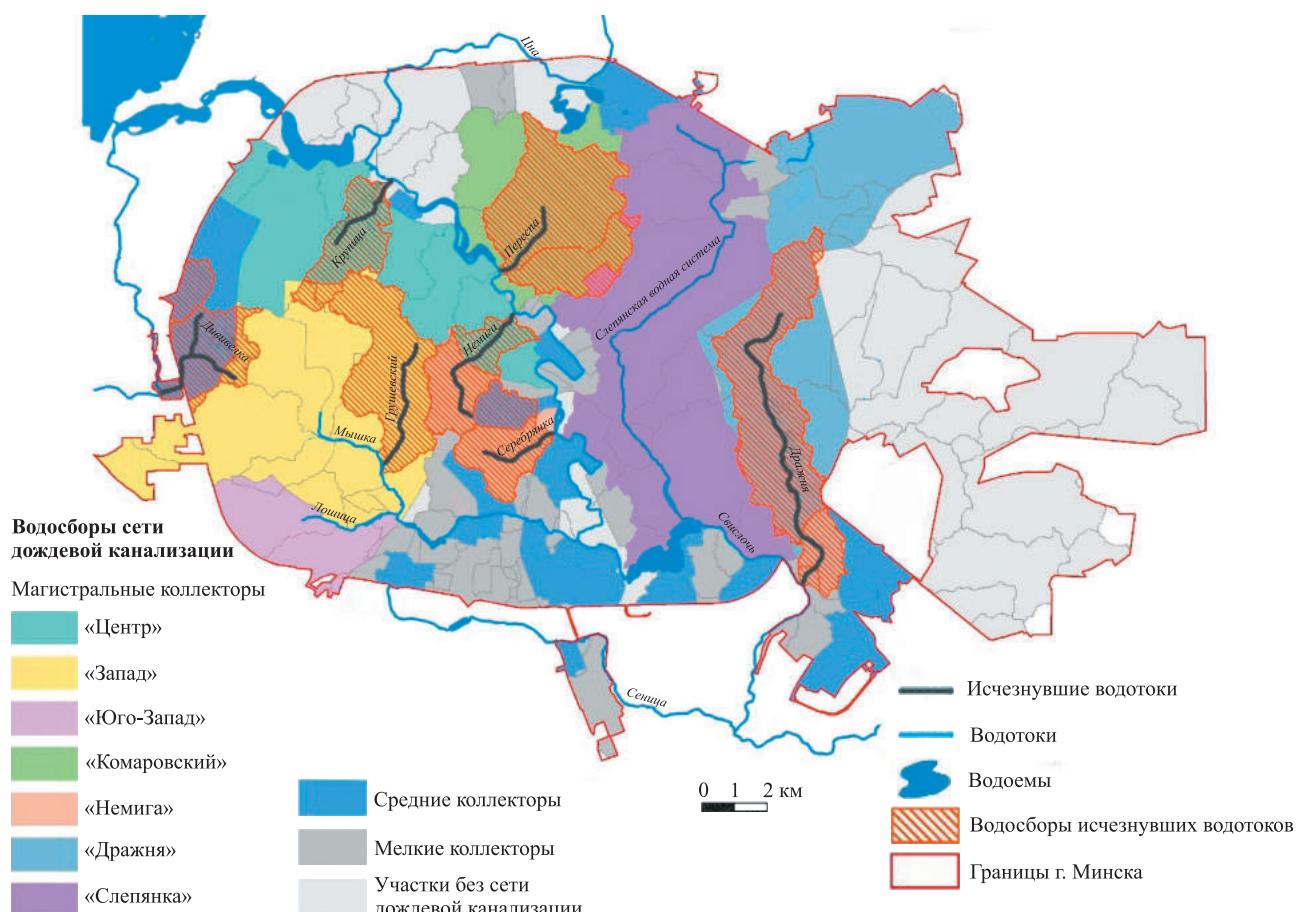


Рис. 4. Картосхема водосборов исчезнувших водотоков на территории г. Минска
 Fig. 4. Schematic map of the disappeared watercourses catchments on the territory of Minsk

2. Фрагментация естественных водосборов вследствие создания сети мелких коллекторов с самостоятельными выпусками в водоток (см. рис. 3). Большинство этих выпусков приурочены к р. Свисочи в центральной части города и к р. Лошице в микрорайонах Курасовщина, Лошица, Минск-Мир и Серова. Доля площади таких водосборов составляет 18,9 %.

3. Укрупнение водосборов магистральных коллекторов по сравнению с исходными водосборами водотоков за счет присоединения части стока смежных водосборов. Данная ситуация характерна для коллекторов дождевой канализации «Комаровский», «Запад», «Немига» и «Дражня» (рис. 5).

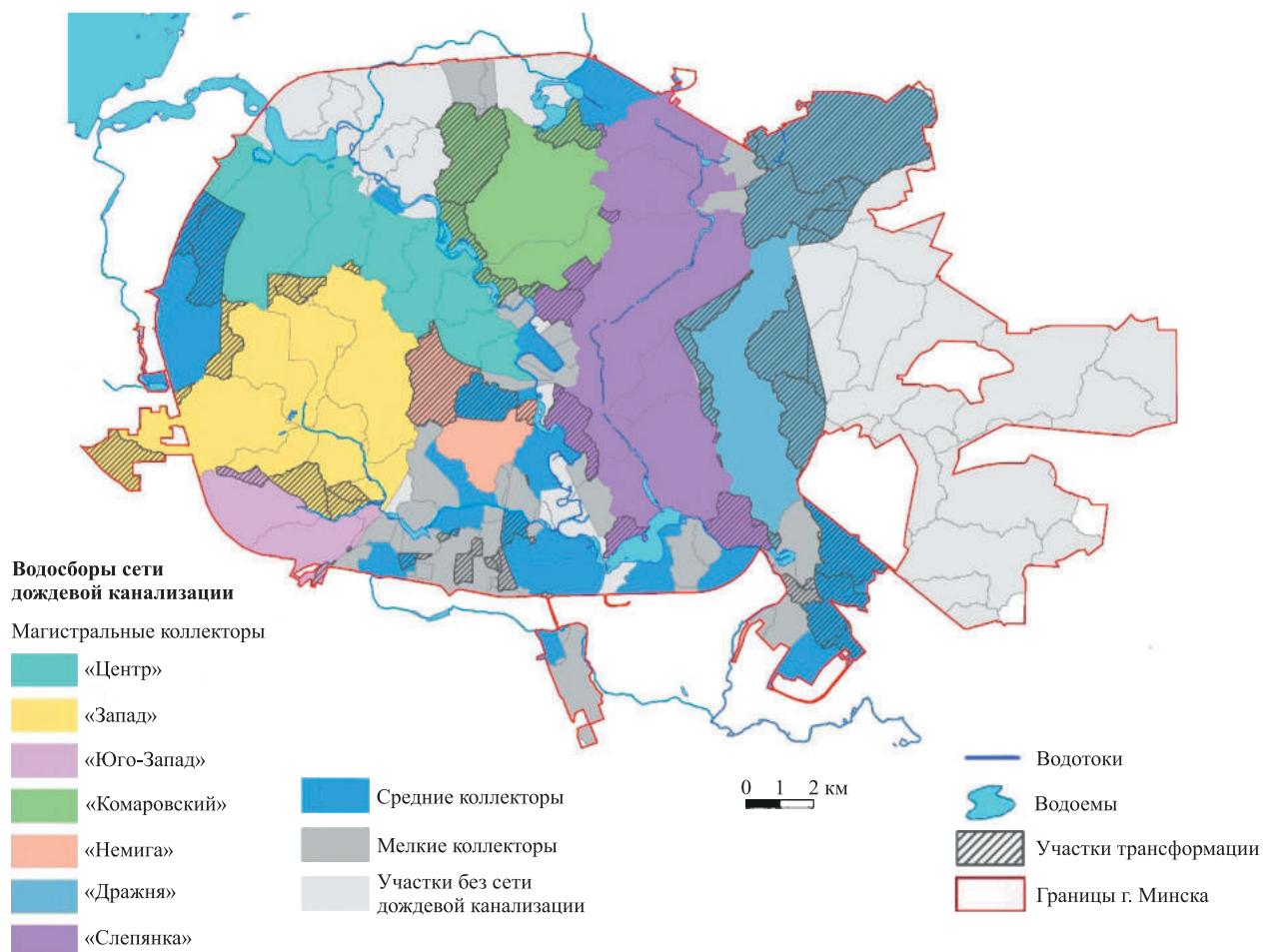


Рис. 5. Картосхема участков водосборов, где произошла переброска поверхностного стока из одного водосбора в другой, на территории г. Минска

Fig. 5. Schematic map of the catchment parts where urban runoff was transferred from one catchment to another on the territory of Minsk

4. Формирование водосборов магистральных коллекторов меньшей площади относительно площади исходных водотоков за счет фрагментации и отведения части стока в другие коллекторы. Такая ситуация наблюдается для коллекторов дождевой канализации «Центр», «Юго-Запад» и «Слепянка» (см. рис. 5).

Доля территорий, водосборная принадлежность которых изменилась из-за антропогенной трансформации и перешла к другому водотоку, в пределах г. Минска составила 17,9 % (59,3 км²).

Заключение

Таким образом, выполненная с применением гидрологического моделирования в ГИС оценка трансформации пространственной структуры естественных водосборов на территории г. Минска позволила сделать следующие выводы.

Несмотря на то что в настоящее время на 75,0 % территории города водотоки канализированы, водосборы системы дождевой канализации для отвода поверхностного стока наследуют черты водосборов естественной гидрографической сети.

Использование гидрологически корректной ЦМР при дальнейшей обработке дает возможность выделить локальные водосборы. Их агрегация позволяет восстановить структуру естественных водосборов, которую можно принять за точку отсчета для оценки антропогенной трансформации.

Анализ данных по формированию коллекторной сети дождевой канализации для отвода поверхностного стока дал возможность провести корректировку границ, получить модель современной структуры водосборов города и выявить участки их пространственной трансформации.

По результатам исследования на территории г. Минска выделены четыре направления трансформации структуры водосборов. Первое направление связано с исчезновением естественного водотока и переходом функции по отводу поверхностного стока к коллекторной сети (доля площади таких водосборов составляет 18,4 %). Второе направление обусловлено фрагментацией водосборов центральной части города вследствие создания сети мелких коллекторов с самостоятельными выпусками в водоток (18,9 % от площади города). Третье направление сопряжено с укрупнением водосборов магистральных коллекторов по сравнению с водосборами исходных водотоков за счет присоединения части стока смежных водосборов. Четвертое направление связано с уменьшением площади водосборов магистральных коллекторов относительно площади исходных водотоков в результате фрагментации и отведения части стока в другие коллекторы. Доля территорий города, изменивших водосборную принадлежность, составляет 17,9 % (59,3 км²).

Библиографические ссылки

1. Алексеева ТИ, Белоконь ЛС, Година ЕЗ, редакторы. *Урбэкология*. Москва: Наука; 1990. 240 с. (Современные проблемы биосфера).
2. Курбатова АС. *Ландшафтно-экологические основы формирования градостроительных структур*. Башкин ВН, редактор. Москва: Маджента; 2004. 400 с.
3. Хомич ВС, Какарека СВ, Кухарчик ТИ, Кравчук ЛА, Струк МИ, Кадацкая ОВ и др. *Городская среда: геоэкологические аспекты*. Минск: Беларусская наука; 2013. 301 с.
4. Овчарова ЕП. *Эколого-геохимическая оценка поверхностного стока с городской территории (на примере г. Минска)* [диссертация]. Минск: [б. и.]; 2006. 174 с.
5. Кадацкая ОВ, Санец ЕВ, Овчарова ЕП. Гидографическая сеть урбанизированных территорий как элемент формирования природного каркаса города. В: Витченко АН, Марцинкевич ГИ, Счастная ИИ, Воробьев ДС, редакторы. *Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии. Материалы VI Международной научной конференции (к 110-летию со дня рождения профессора В. А. Дементьева); 13–16 ноября 2018 г.*; Минск, Беларусь. Минск: Белорусский государственный университет; 2018. с. 194–196.
6. Овчарова ЕП, Санец ЕВ, Бокая ГМ. Малые водные объекты г. Минска: гидрохимическая трансформация и эколого-рекреационная значимость. В: Лукашёв ОВ, Зуй ВИ, Санько АФ, Литвинюк ГИ, Творонович-Севрук ДЛ, Силицкая ОВ, редакторы. *Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий. Материалы II Международной научной конференции; 16 февраля 2021 г.*; Минск, Беларусь. Минск: Белорусский государственный университет; 2021. с. 258–262.
7. Овчарова ЕП. Этапы формирования водохозяйственной геотехсистемы крупного города (на примере г. Минска). В: Ледащева ТН, Редина ММ, Станис ЕВ, Парахина ЕА, редакторы. *Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сборник трудов XXV Международной научно-практической конференции; 26–28 апреля 2024 г.*; Москва, Россия. Том 2. Москва: Российский университет дружбы народов; 2024. с. 318–322.
8. Пьянков СВ, Шихов АН. *Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2017. 148 с.
9. Курлович ДМ, Гриб СВ, Ковальчик НВ, Иванов ДВ. Использование ГИС-моделирования для оценки гидрологических процессов. *Вестник БГУ. Серия 2. Химия. Биология. География*. 2013;2:75–80. EDN: STENMD.
10. Борщ СВ, Самсонов ТЕ, Симонов ЮА, Львовская ЕА. Визуализация гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек средствами ГИС-технологий. *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2013;349:47–62. EDN: RDJAJB.
11. Куракина НИ, Ковчик ВС. Геоинформационная система моделирования гидрологических процессов подтопления территории. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2020;5:66–73. EDN: YNOH1Y.
12. Клебанович НВ, Киндеев АЛ, Сазонов АА. Обоснование уточнения элементарных бассейнов методом геоинформационного моделирования (на примере р. Синюхи). В: Кольмакова ЕГ, Гагина НВ, Гледко ЮА, Карпиченко АА, Лукашёв ОВ, Матюшевская ЕВ и др., редакторы. *Материалы I Белорусского географического конгресса: к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества; 8–13 апреля 2024 г.*; Минск, Беларусь. Часть 1, Современные проблемы гидрометеорологии. Минск: Белорусский государственный университет; 2024. с. 240–244.
13. Kaur R, Gupta K. Blue-green infrastructure (BGI) network in urban areas for sustainable storm water management: a geospatial approach. *City and Environment Interactions*. 2022;16:100087. DOI: 10.1016/j.cacint.2022.100087.
14. Васильева НВ. Антропогенные изменения гидрографической сети в Великом Новгороде. *Общество. Среда. Развитие (Terra Humana)*. 2011;1:215–222. EDN: NTLVLT.

15. Яшков ИА, Иванов АВ, Шешнёв АС. Анализ пространственно-временных изменений городской естественной и искусственной дренажных сетей по серии карт (на примере Саратова). В: Тикунов ВС, редактор. *ИнтерКарто/ИнтерГИС-14. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Материалы международной конференции; 24 июня – 1 июля 2008 г.; Саратов – Урумчи, Россия – Китай. Том 1.* Саратов: [б. и.]; 2008. с. 204–208.

16. Савич-Шемет ОГ, Томина НМ, Антух ЮП. Оценка антропогенной преобразованности водосборов малых рек г. Минска. В: Карабанов АК, Бамбалов НН, Березовский НИ, Бровка ГП, Гаврильчик АП, Волчек АА и др., редакторы. *Природопользование. Выпуск 18.* Минск: Институт природопользования НАН Беларуси; 2010. с. 74–80.

17. Радчикова ЕС. Исследование истории трансформации гидрографической сети урбанизированных территорий на примере г. Минска. *Российский журнал прикладной экологии.* 2017;1:44–49. EDN: YOCYVJ.

Получена 05.01.2025 / исправлена 03.03.2025 / принята 06.03.2025.
Received 05.01.2025 / revised 03.03.2025 / accepted 06.03.2025.